

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри
Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2020 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: Сенсорний пристрій контролю якості повітря

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи ДП-61
(шифр групи)

ЛЕСПУХ Сергій Володимирович _____ (підпис)
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник проф., д.т.н., проф. Юрій ЯКИМЕНКО _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Консультант з технічних питань проф., к.т.н., доц. Анатолій ОРЛОВ _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.
Георгій СВЄЧНИКОВ _____

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО _____

Рецензент _____ (підпис)
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____ (підпис)

Київ – 2020 року

Завдання на дипломну роботу

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет електроніки _____
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 153. Мікро – та наносистемна техніка _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект (роботу) студенту

Леспук Сергій Володимирович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Сенсорний пристрій контролю якості повітря _____

керівник проекту (роботи) проф., д.т.н., проф. Якименко Ю.І. _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Алгоритм роботи сенсорного пристрою для контролю якості повітря за NDIR технологією з можливістю передачі даних через Wi-Fi, Bluetooth та USB.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) 1) Проаналізувати існуючі розробки. 2) Обрати метод виміру концентрації CO₂. 3) Розглянути та підібрати компоненти пристрою. 4) Створити алгоритм роботи пристрою.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Презентація – принцип роботи сенсора, спектральні характеристики компонентів, схема підключення пристрою, таблиці порівняння та характеристик.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
1	Літературний огляд	Березень 2020	
2	Аналіз існуючих методів вимірювання CO ₂	Квітень 2020	
3	Аналіз існуючих пристроїв	Квітень 2020	
4	Розгляд та підбір компонентів	Травень 2020	
5	Розробка алгоритму роботи	Травень 2020	
6	Оформлення дипломної роботи	Червень 2020	

Студент

(підпис)

Леспук С.В.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Якименко Ю.І.

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

Реферат

Роботу викладено на 60 сторінках , вона містить 4 розділи, 27 ілюстрацій, 2 таблиці та 16 джерел у переліку посилань.

Об'єктом дослідження став сенсорний пристрій контролю якості повітря.

Предмет роботи – індикаторний пристрій для визначення концентрації CO₂ у приміщеннях.

Метою даної роботи є розробка доступного пристрою для вимірювання концентрації CO₂ у приміщеннях.

Перший інформаційно-аналітичний розділ дозволив розглянути та порівняти вже існуючі розробки, а також обрати метод виміру концентрації CO₂.

У другому розділі викладено принцип роботи NDIR сенсору, та розгляд можливих компонентів, їх аналіз.

У третьому розділі вказані характеристики мікроконтролера.

У четвертому розділі підбір компонентів за характеристиками та ціною, а також більш детально розглянуто комплекцію приладу.

Ключові слова: NDIR, газоаналізатор, вуглекислий газ, концентрація CO₂, ІЧ-випромінювання

Abstract

The work is presented on 60 pages, it contains 4 sections, 27 illustrations, 2 tables and 16 sources in the list of references.

The object of the study was a sensor device for air quality control.

The subject of work is an indicator device for determining the concentration of CO₂ in the premises.

The aim of this work is to develop an affordable device for measuring the concentration of CO₂ in the premises.

The first information-analytical section allowed to consider and compare existing developments, as well as to choose a method of measuring CO₂ concentration.

The second section describes the principle of operation of the NDIR sensor, and consideration of possible components, their analysis.

The third section lists the characteristics of the microcontroller.

In the fourth section, the selection of components by characteristics and price, as well as a more detailed consideration of the configuration of the device.

Keywords: NDIR, gas analyzer, carbon dioxide, CO₂ concentration, infrared radiation

Зміст

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1.АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОЗРОБОК ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	7
2.ПРИНЦИП РОБОТИ NDIR ДАТЧИКІВ CO₂.....	14
2.1.Розгляд інфрачервоних джерел.....	17
2.1.1 ІЧ-лампа.....	17
2.1.2. Інфрачервоні світлодіодні елементи для вимірювання газів.....	18
2.1.3. Інфрачервоні джерела світла на основі MEMS	19
2.2. Розгляд світлових фільтрів.....	21
2.2.1. Інфрачервоні напівпровідникові фільтри.....	24
2.2.2. ІЧ-фільтри довгого проходу.....	25
2.2.3. ІЧ-смугові фільтри.....	26
2.2.4.Фільтри на фотонних кристалах.....	27
2.3. Розгляд ІЧ детекторів.....	33
2.3.1. Детектори PbSe.....	34
2.3.2. Термопари.....	36
2.3.3. Піроелектричні детектори.....	38
3. ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОКОНТРОЛЕРА.....	40
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	43
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	56

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

CO₂ – вуглекислий газ, діоксид карбону

ІЧ-випромінювання – інфрачервоне випромінювання

NDIR – недисперсійний інфрачервоний сенсор

NWIR (Near Wave Infrared) – ближнє ІЧ-випромінювання (0,7–0,9 мкм)

SWIR (Short Wave Infrared) – коротке ІЧ-випромінювання (0,9–3,0 мкм)

MWIR (Middle Wave Infrared) – середнє ІЧ-випромінювання (3–5 мкм)

LWIR (Long Wave Infrared) – довгохвильове ІЧ-випромінювання (8-12 мкм)

Ppm (Parts Per Million) – частин на мільйон

ВСТУП

Наше навколишнє середовище має у своєму складі безліч газів. Основну процентну частину становить азот (78,08%). Надалі кисень (20,95%), аргон (0,93%), водяна пара (0,5-4%) і вуглекислий газ (0,034%). У повітрі також в незначних кількостях міститься водень, гелій та інші благородні гази. Концентрація основної більшості газів в атмосфері практично залишається постійною. Вийнятком є вода і вуглекислий газ (CO_2), процентна частка яких може сильно змінюватися в залежності від оточуючих умов.

Основне джерело вуглекислого газу в приміщенні це людина. У будь-якому місці, де знаходяться люди - шкільні класи та дитячі садки, офіси і конферент зали, фітнес центри і басейни - завжди існує ймовірність перевищення норми вуглекислого газу внаслідок дихання людей.

Далеко від міст, на природі, рівень CO_2 в повітрі становить близько 0,035%. У такому випадку людина відчуває себе комфортно. Але в межах міста, особливо в переповненому транспорті або закритих приміщеннях, вуглекислий газ може значно перевищувати норми. Вчені довели, що в процентному кількості 0,1-0,2% вуглекислий газ стає токсичним для людини. Такі симптоми як головний біль або слабкість виникають від надлишку вуглекислого газу.

1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РОЗРОБОК ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Дослідження впливу CO₂ на самопочуття людини показали, що при високих концентраціях цього газу в повітрі з'являється значне зниження уваги і виникає хронічна втома. Більш того, вуглекислий газ стає причиною підвищеної захворюваності людей. У першу чергу страждає носоглотка і дихальні шляхи, підвищується число астматичних нападів. При тривалому впливі вуглекислого газу на організм людини, у крові починають відбуватися біохімічні зміни, що призводить до гіпертонії, ослаблення серцево-судинної системи і т. д.

Контролювати вуглекислий газ потрібно не тільки в школах, дитячих садах і офісах, але і в квартирах, а особливо в спальнях. Підвищений вміст вуглекислого газу в квартирі може призвести до головної болі і безсонниці.

Для нормування вуглекислого газу в повітрі, приміщення повинно бути оснащено вентиляційними системами і регулярно провітрюватися. Якщо ж його концентрація часто перевищує норму, в приміщеннях додатково встановлюють очищувачі повітря.

Для рослин справа йде з точністю до навпаки. У першу чергу для них вуглекислий газ є джерелом вуглецю для процесу фотосинтезу. Численні досліді показали, що при збагаченні повітря вуглекислим газом не тільки зростає продуктивність рослин і прискорюється їх зростання, але також підвищується стійкість до різних захворювань. Концентрація вуглекислого газу в повітрі, що надходить в теплиці з вулиці, виявляється замалою для рослин, особливо в сонячні дні, коли процес фотосинтезу відбувається з більшою інтенсивністю. Тому в теплицях люди організовують спеціальні підгодівлі з вуглекислого газу для поліпшення росту рослин і збільшення врожаїв.

Дуже чутливими до вуглекислого газу виявляються гриби. Наприклад, для отримання опеньків з дуже маленькими капелюшками і довгими ніжками, використовують підвищення рівня вуглекислого газу. Така незвична форма цих

грибів спрощує процес їх збору. Печериця відноситься до вуглекислого газу при різних стадіях росту по-різному. У фазі вегетативного росту цей гриб нормально переносить високу концентрацію CO_2 . Але в період утворення плодів і плодоношення необхідно знижувати рівень вуглекислоти в приміщенні шляхом інтенсивного вентилявання і регулярного надходження свіжого повітря. Високий вміст вуглекислого газу в цей період погіршує якість плодових тіл і негативно впливає на їх зростання.

За останні 50 років концентрація вуглекислого газу в атмосфері землі підвищилася з 0,0315% або 315 ppm до 400 ppm і росте на 2.2 ppm в рік. Концентрація CO_2 майже не залежить від місця на землі - повітря добре перемішується. Як це не дивно, вміст CO_2 в міському повітрі і в лісі відрізняється всього на 10 ppm. Вважається, що концентрація до 700 ppm для людини не помітна і ніяк не впливає на його здоров'я і самопочуття.

Концентрація CO_2

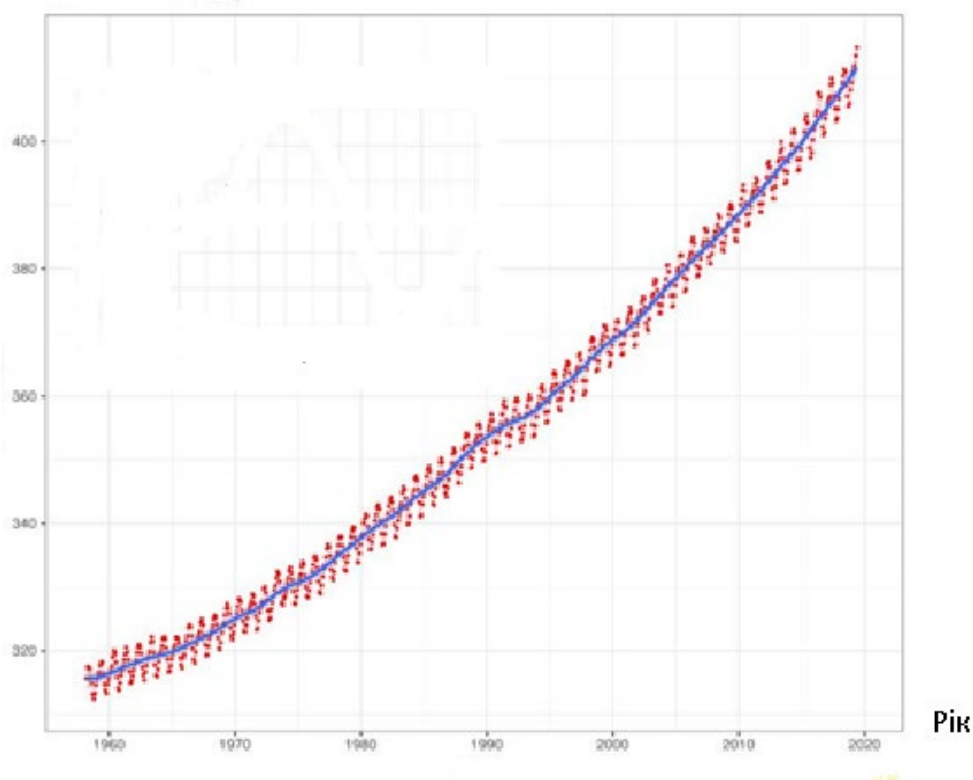


Рисунок 1.1 - Залежність зростання концентрації CO_2 з кожним роком[2]

Вище перераховані далеко не всі випадки, коли вимір рівня CO₂ є необхідним. Це привело до появи приладу, який називається газоаналізатор вуглекислого газу. Залежно від області застосування газоаналізатори мають різні форми (переносні або стаціонарні), функції (визначення кількості вуглекислого газу в повітрі, виявлення витоків і т. Д.) І принципи дії (мас-спектрометрія, фотоакустичний аналіз і багато інших).

Універсальність аналізаторів вуглекислого газу дозволяє без зусиль використовувати їх в різних областях людської діяльності - на роботі і вдома, в навчальних класах і спортзалах, в теплицях або на грибних фермах, на заправних станціях, в промисловості і на виробництві. Вони зручні у використанні і забезпечують постійний контроль над вуглекислим газом там, де це необхідно.

У ході аналізу існуючих розробок були виявлені наступні пристрої: прилад для вимірювання концентрації CO₂ фірми «UNI-T», «AZ Instruments», а також фірми «TFA». Нижче наведена таблиця для порівняння цих пристроїв.

Таблиця 1.1 - Порівняння параметрів та цін існуючих пристроїв [3][10][13]

	Фірми виробників пристроїв		
Характеристики	«UNI-T»	«AZ Instruments»	«TFA»
Ціна	91.17\$	139.00\$	158.72\$
Діапазон вимірювання	400ppm ~ 5000ppm	400ppm ~ 10000ppm	0-8000 ppm
Похибка вимірювання	± 5%rdg + 50ppm	± 5%rdg + 50ppm	±100 ppm
Країна виробник	Китай	Китай	Китай

Проектований пристрій – індикаторний пристрій для виміру концентрації CO₂ призначений для домашніх приміщень, спортивних закладів (спортзалів) тощо.

В якості доступного прикладу, що можна знайти на ринку приладів для виміру CO_2 надалі буде розглянутий пристрій компанії «UNI-T», хоч у нього діапазон вимірювання менше, ніж у інших наведених в таблиці приладів, та треба визнати, що для дому чи спортзалу цього буде достатньо. Проаналізувавши похибки подібних гаджетів, ми бачимо що у газоаналізатора компанії «UNI-T» достатньо висока точність вимірювання.



Рисунок 1.1. Фото приладу для вимірювання CO_2 фірми «UNI-T»[3]

Особливості приладу для вимірювання якості повітря «UNI-T»:

- Автоматична корекція базової лінії.
- Звуковий і візуальний сигнал тривоги.
- Індикатор низького заряду батареї.
- Автоматичне відключення живлення.
- Підсвічування.
- Вимір вологості та температури повітря.

За характером вимірюваного фізичного параметра методи газового аналізу можна розділити на механічні, акустичні, теплові, магнітні, оптичні, іонізаційні, мас-спектрометричні, електрохімічні, напівпровідникові.

До механічних методів відноситься волюмоманометричний метод, заснований на вимірюванні об'єму або тиску газової проби після хімічного впливу на неї, яке може полягати, наприклад, в послідовному поглинанні компонентів аналізованого газу відповідними реагентами в поглинальних судинах. Мінімально визначаються концентрації (МОК) від 0,001 до 0,01%.

До механічних методів також відносять пневматичний метод (аеростатичний і аеродинамічний). У першому випадку вимірюють щільність газової суміші, в другому - залежні від щільності і в'язкості параметри таких процесів, як дросселирование газових потоків, взаємодія струменів, вихреобразование і т.д. Ці методи застосовують для аналізу бінарних і псевдобінарних сумішей, напр. для визначення H_2 в повітрі, H_2 в етилену, CO_2 в інертних газах, Cl_2 в H_2 і т.д. МОК методу від 0,01 до 0,1%.

Акустичні методи засновані на вимірі поглинання або швидкості поширення звукових і ультразвукових хвиль в газовій суміші. Методи не вибагливі і застосовуються, зокрема, для визначення CH_4 , O_2 , H_2 в бінарних та псевдобінарних сумішах. МОК методу від 0,001 до 0,1%.

Теплові методи засновані на вимірі теплопровідності газової суміші (термокондуктометричний метод) або теплового ефекту радіації за участю визначається компонента - (термохімічний метод). Термокондуктометричний методом знаходять зміст, напр., He , CO_2 , H_2 , CH_4 в бінарних та псевдобінарних сумішах (МОК від 0,01 до 0,1%). Термохімічний метод використовують для виборчого визначення CO , CH_4 , O_2 , H_2 , контролю в повітрі вибухонебезпечних і пожежонебезпечних домішок (сумішей газоподібних вуглеводнів, парів бензину і т.д.). Наприклад, при визначенні метану його спалюють у присутності каталізатора

(Pt і Pd на активному Al_2O_3). Кількість виділився тепла, пропорційне концентрації CH_4 , за допомогою терморезисторів перетворюють в електричний сигнал, який реєструють. МОК методу від 0,001 до 0,01%.

У магнітних методах вимірюють фізичні характеристики газу, обумовлені магнітними властивостями визначається компонента в магнітному полі. З їх допомогою контролюють вміст O_2 , що відрізняється аномально великою парамагнітною сприйнятливістю. Найбільш поширений термомагнітний метод, заснований на залежності парамагнітної сприйнятливості O_2 від його концентрації при дії магнітного поля в умовах температурного градієнта. МОК методу від 0,01 до 0,1%.

В оптичних методах вимірюють оптичну щільність (абсорбція методи), інтенсивність випромінювання (емісійні методи), коефіцієнт заломлення (рефрактометричний). Абсорбція методи, засновані на вимірі селективного поглинання ІК, УФ або видимого випромінювання контрольованим компонентом, застосовують, наприклад, для виборчого визначення NO_2 , O_3 , H_2S , SO_2 , CS_2 , формальдегіду, фосгену, Cl_2 , парів Hg, Na, Pb та інших. МОК методу від 0,00001 до 0,01%. Широко використовується оптоакустичний метод, заснований на пульсації тиску газу в приймальному випромінювання при поглинанні переривчастого потоку випромінювання, що пройшов через аналізований газ. Метод дозволяє визначати CO, CO_2 , CH_4 , NH_3 , SO_2 , ряд органічних сполук. МОК методу від 0,001 до 0,01%. Джерела випромінювання в абсорбційних методах - лампи розжарювання, ртутні, водневі, ртутно-кадмієві, кадмієві, ніхромові спіралі.

За фотоколориметричні оптичного методу попередньо проводять кольорову реакцію контрольованого компонента з відповідним реагентом в газовій фазі, в індикаторному реакторі або на поверхні твердого носія (у вигляді стрічки, таблетки, порошку) і вимірюють інтенсивність забарвлення продуктів реакції. Метод застосовують також для виборчого визначення оксидів азоту, CO, CS_2 , NH_3 , ацетилену, фосгену, формальдегіду та ін. МОК методу від 0,000001 до 0,001%.

В емісійних оптичних методах вимірюють інтенсивність випромінювання визначених компонентів. Випромінювання можна порушити електричним розрядом (МОК методу від 0,0001 до 0,1%), полум'ям, світлом і іншими джерелами (при використанні лазера МОК досягає 0,0000001 до 0,000001%). Ці методи застосовують для кількісного визначення безлічі елементів і сполук.

У хемілюмінесцентному методі вимірюють інтенсивність люмінесценції, що супроводжує деякі хімічні реакції в газах. Метод застосовують, зокрема, для визначення O_3 і оксидів азоту. Наприклад, визначення NO засноване на його окисненні озоном. МОК методу від 0,000001 до 0,0001%.

Оптичні методи, засновані на розсіюванні світла, отримали розвиток завдяки лазерній техніці. Вони застосовуються, зокрема, при дистанційному контролі чистоти атмосфери для визначення головним чином шкідливих домішок - органічних сполук, оксидів азоту, сірки, вуглецю і т.д. МОК методу від 0,000001 до 0,1%.

Багатопараметричний обчислювальний метод заснований на спільному вимірі ряду фізичних параметрів суміші відомого як складу і на вирішенні за допомогою ЕОМ системи рівнянь, що описують взаємозв'язок Реальні показники можуть відрізнятися з концентраціями визначених компонентів. Одночасно можна вимірювати, наприклад, оптичну щільність середовища при різних довжинах хвиль, ефективність іонізації газів і парів на каталітично активних поверхнях з різними температурами нагріву і т.д.

У данній роботі буде розглянуто метод спектрометрії, а саме за NDIR технологією, тому що вона має найбільш надійною і простою за конструкцію.

2. ПРИНЦИП РОБОТИ NDIR ДАТЧИКІВ CO₂

Недисперсійні інфрачервоні (NDIR) датчики представляють собою прості спектроскопічні пристрої, часто використовувані для аналізу газів. Ключовими компонентами є інфрачервоне джерело, вимірювальна камера або світлова трубка, фільтр довжини хвилі і інфрачервоний детектор. Газ накачується або потрапляє природним чином в вимірювальну камеру, потім концентрація газу вимірюється електрооптичним шляхом, завдяки поглинанню певної довжини хвилі в інфрачервоному спектрі (ІЧ).

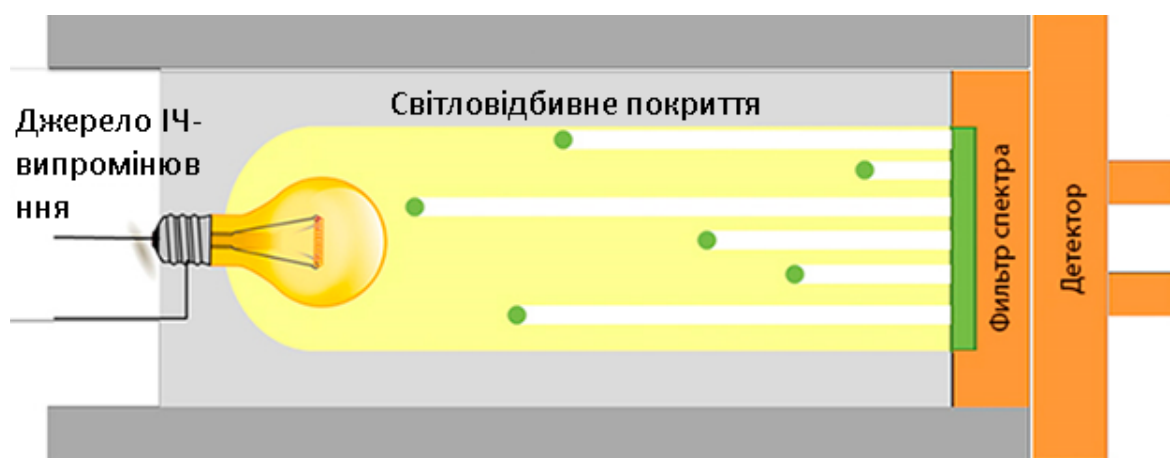


Рисунок 2.1 - Принцип роботи технології NDIR [5]

ІЧ-промінь прямує через вимірювальну камеру до детектора. Перед детектором встановлений оптичний фільтр, який поглинає все світло, крім певної довжини хвилі, яка може бути поглинена молекулами вимірюваного газу. Молекули інших газів не поглинають світло на обраній довжині хвилі, так що вони не можуть вплинути на кількість світла, що потрапляє на детектор. ІЧ-сигнал від джерела зазвичай подається з особливим перериванням або модуляцією, для того щоб фонові температурні сигнали не створювали непотрібних перешкод.

Вимірювальна камера повинна дозволяти інфрачервоному променю вільно відбиватись від стінок на шляху до детектора, тобто якість покриття вимірювальної камери безпосередно впливає на точність та довговічність приладу.

Інтенсивність інфрачервоного випромінювання, з якої промінь досягає детектора, обернено пропорційна концентрації цільового газу в вимірювальній камері. Коли концентрація в камері дорівнює нулю, детектор буде отримувати максимальну інтенсивність інфрачервоного променя. У міру збільшення концентрації інтенсивність інфрачервоного випромінювання, що вражає детектор, зменшується. Закон Бугера описує точне співвідношення інтенсивності інфрачервоного випромінювання і концентрації газу:

$$I=I_0*e^{kP} \quad (2.1)$$

де: I - інтенсивність світла, що потрапляє на детектор;

I_0 - інтенсивність світла, виміряна при порожній камері;

k - показник поглинання вимірюваного газу;

P - шукана концентрація вимірюваного газу.

Датчики NDIR можуть використовуватись для вимірювання практично усіх неорганічних та органічних газів, але найчастіше їх використовують для вимірювання вуглекислого газу, оскільки жодний інший метод вимірювання не працює так просто, надійно і точно для цього газу.

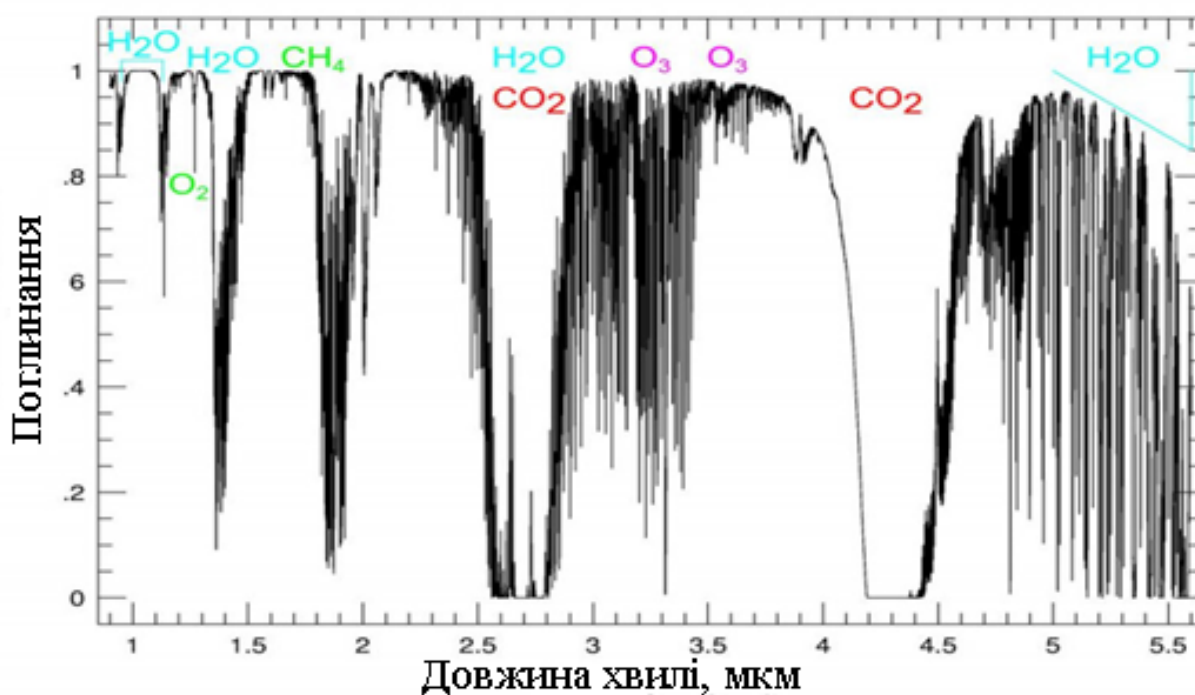


Рисунок 2.2 - Співвідношення концентрації до довжини хвиль різних газів[6]

Необхідно відзначити довгий термін служби приладів з використанням NDIR-технології. Наприклад, у більшості датчиків компанії Unit-T очікуваний термін служби складає більше 15 років, а гарантія виробника діє 5 років. Так само, завдяки технології самокалібрування ABC, датчики Unit-T не вимагають обслуговування, що робить їх привабливими для багатьох сфер застосування.

Типові сфери застосування NDIR датчиків:

- ОВК
- Регулювання циклу в самоочищаються печах
- Контроль вироблення автомобільних і димових газів
- Тепличні господарства, аграрний комплекс
- Збір даних для систем оповіщення а небезпечних зонах
- Виявлення витоків газу
- Моніторинг рівня звалищного газу

- Дихальні алкотестери

Було визначено, що основними компонентами датчика NDIR є :

1. інфрачервоне джерело
2. фільтр довжини хвилі
3. інфрачервоний детектор

У наступних підрозділах більш детально розглядаються основні компоненти датчика NDIR.

2.1. Розгляд інфрачервоних джерел

Датчик газу NDIR потребує інфрачервоне джерело для збудження молекул газу. Для цієї мети часто використовуються теплові випромінювачі, такі як видимі / інфрачервоні лампи ІЛТ. Їх робоча температура повинна бути якомога вище для отримання великої вихідної інтенсивності і сигналу детектора. Лампи зі скляною колбою працюють при більш високих температурах нитки напруження, ніж інші нагрівальні елементи розжарювання або керамічні. Оболонка може бути заповненою газом або вакуумної. Однак пропускання скляної оболонки обмежує корисний спектральний діапазон і обмежує типи молекул газу, які можуть бути виміряні за допомогою NDIR.

2.1.1. Інфрачервоні лампи

Видима/ІЧ-лампа є дуже економічно ефективним компонентом для датчика NDIR, але має обмежений ІЧ-діапазон. Для виявлення вуглекислого газу (CO_2) і вуглеводнів (HC) це ідеальний метод.

Найбільш бажані характеристики лампи NDIR:

- високий ІЧ вихід
- точне положення нитки напруження
- маленький розмір
- довгий термін життя
- низька теплова постійна часу

Остання характеристика важлива, якщо джерело живлення лампи NDIR повинен модулюватися під час роботи для компенсації теплових фонових сигналів.

Лампи ILT Visible/IR оснащені тонкими скляними колбами, які зменшують поглинання інфрачервоного випромінювання і забезпечують більшу потужність у інфрачервоному діапазоні. Нитки з подвійною спіраллю працюють при високих температурах, є міцними і геометрично точними для застосувань, що вимагають широкого спектрального випромінювання і чудових оптичних характеристик.

Лампи для газових датчиків ILT NDIR пропонуються в розмірах T-1 і T-3/4 з проводами або двоконтактними підставами і працюють при 5 вольтах. Доступно декілька версій, які працюють від 45 мА до 150 мА з номінальним терміном служби від 5000 до 100 000 годин.

2.1.2. Інфрачервоні світлодіодні елементи

У датчиках технології NDIR також застосовуються інфрачервоні світлодіоди для виявлення газів.

Прикладом такого застосування є світлодіод AK9700AE – це інфрачервоний світлодіодний елемент (ІЧ-світлодіод) з піковою довжиною хвилі випромінювання в інфрачервоній смузі поглинання CO₂.

У порівнянні з лампою, що використовується у звичайному датчику CO₂ типу NDIR, вона може керувати випромінюванням світла з високою швидкістю, а також може різко зменшити споживання струму датчика CO₂, поєднуючись з інфрачервоним приймальним елементом світла АКМ – АК9710AE, який крім того, має вбудований світлоприймальний елемент для корекції температури, а високоточне зондування може бути реалізовано за допомогою моніторингу кількості люмінесценції. Оскільки AK9700AE має невеликий тип кріплення на поверхні, він ефективний для мініатюризації датчика. Оскільки світлодіоди мають набагато довший термін експлуатації, ніж лампочки, можна отримати надійний датчик.

2.1.3. Інфрачервоні джерела світла на основі MEMS

У переважній більшості NDIR датчиків на даний момент використовують дешеві (<\$1) мікро-лампи з вольфрамової ниткою, але це створює ряд проблем для інженера з точки зору:

- обмежена частота модуляції;
- високе споживання електроенергії;
- оптичний дрейф (> 2% /1000 год)
- обмеження компактності (діаметр 3 мм, довжина ~ 6 мм).

Завдяки склу, ККД передачі ІЧ знижується до 30-40% при довжині хвилі 4,26 мкм.

Щоб вирішити деякі з цих питань у середньому ІЧ діапазоні (3-5мкм) розробили світлодіоди, оскільки він пропонує швидку реакцію ($>20\text{кГц}$) та вузьку смугу (200-300нм), високу оптичну вихідну потужність ($>200\text{мВт}$) при 4,3 мкм. Однак, споживання електроенергії порівняно високе, а також важливо відмітити, що вихідна потужність може змінюватись до $1,2\%/^{\circ}\text{C}$ коливання температури навколишнього середовища. Світлодіоди є більш складним рішенням для електроніки та обробки сигналів, і вони наразі дорогі (>5 доларів).

ІЧ-джерела **MEMS** можуть подолати деякі недоліки мікроламп і світлодіодів. Зазвичай вони складаються з утеплювача, вбудованого всередину діелектричної мембрани, що підтримується на кремнієвій підкладці, як зображено на рис. 2.1.1.

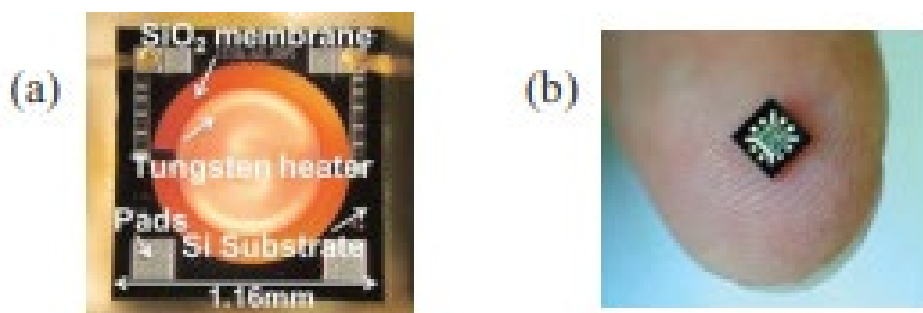


Рисунок. 2.1.1 - Фото ІЧ-випромінювача на основі MEMS [14]

При подачі струму нагрівача температура може досягати $400 - 700\text{ C}$ і надавати випромінювання. Для теплової ізоляції використовується тонка діелектрична мембрана нагрівач від підкладки і, отже, зменшує споживання електроенергії ($<50\text{мВт}$). Діелектрик має низьку теплоутворення. Маса, мінімізуючи час нагріву та максимізуючи частотну характеристику. Джерело ІЧ-МЕМ може бути досить компактним (3мм x 3мм x 1,5мм), де ІЧ-випромінювач можна розглядати як точкове джерело, тим самим спрощуючи дизайн оптики, такий як відбивачі та позиціонування фільтра.

2.2. Розгляд світлових фільтрів

За останні декілька десятиліть багатошарові тонкоплівкові фільтри (TFF) стали дуже розповсюдженими. Ці оптичні елементи забезпечують безліч різних застосувань і ринків фотоніки у видимому (400-700 нм), ближньому інфрачервоному (700-1000 нм) і короткохвильовому інфрачервоному (1000-3000 нм) діапазонах довжин хвиль. Дві основні області застосування були обумовлені і призвели до змін в оптичних фільтрах:

- Включення мультиплексування з поділом по довжині хвилі, вирівнювання посилення і компенсації дисперсії в оптоволоконних телекомунікаційних мережах великої місткості (1300-1600 нм).
- Надання більшого сигналу з меншим фоном для мікроскопів і спектроскопів, які досліджують присутність і концентрації певних хімічних речовин, через такі властивості, як флуоресценція або комбінаційне розсіювання (400-1200 нм).

Для вирішенню цих та інших завдання у діапазоні довжина хвиля VIS/NIR/SWIR технологія оптичних фільтрів зазнала змін у довговічності, складності форми фільтра та вартості. У фільтрах більше не використовують м'які покриття, засновані на ламінуванні, для захисту їх від елементів з можливістю їх заміни у міру зношування и вицвітання. Сучасні покриття забезпечують фільтри, розроблені з урахуванням найсуворіших вимог до навколишнього середовища і терміну придатності. Розробка оптичного моніторингу на місці і автоматичного управління пристроєм для нанесення покриттів з динамічної налаштування конструкції дозволила успішно виробляти оптичні фільтри все більш складної форми, забезпечуючі покращення співвідношення сигнал/шум и сприяючі багатосмуговим спектральним характеристикам.

Робота на більш довгих хвилях полегшує візуалізацію і виявлення явищ з більш низькою енергією, які інакше не спостерігаються у видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах. Без шуму від фонові сонячної радіації VIS-SWIR системи MWIR/LWIR можуть виконувати теплобачення і термографію, виявляючи випромінювання чорного тіла, котре є організмом або машиною. Більш гарячі об'єкти, такі як нещодавно використані механізми або вихлопні гази автомобілів ($100-500^{\circ}\text{C}$), випускають випромінювання на більш коротких довжинах хвиль MWIR (3-5 мкм); більш холодні об'єкти кімнатної температури ($20-50^{\circ}\text{C}$), такі як люди або неактивні механізми, випускають випромінювання, що виявляється в LWIR (10-12 мкм), відповідно до закону випромінювання Планка.

Як наслідок, зображення в діапазонах довжин хвиль MWIR і LWIR можуть бачити крізь пил, туман, хмари і туман. Щоб вибірково аналізувати конкретні теплові діапазони, в цих системах камер можна використовувати оптичні смугові фільтри з певними центральними довжинами хвиль через колесо фільтра, щоб «бачити» тільки в області, що цікавить при блокуванні небажаних фонових сигналів.

Інфрачервоне світло, що поширюється на детектор, буде поглинатися відповідно до унікальним спектральним відбитком, пов'язаних з видом присутньої молекули газу. Якщо смуга пропускання оптичного фільтра відповідає піковій смузі поглинання обраного газу (або газів), то інтенсивність фільтрування ІК-світла, що досягає детектора, буде залежати тільки від концентрації обраного газу. Якщо жоден з обраних газів не присутній, інтенсивність буде відповідати контрольному рівню. У присутності обраного газу інтенсивність на детекторі буде змінюватися зі зворотною пропорційністю концентрації газу відповідно до закону Ламберта-Бера.

Оптичні фільтри в сенсорних системах NDIR аналогічні смуговим фільтрам з вузьким випромінюванням, використовуваним для виявлення і аналізу флуоресценції у видимому діапазоні довжин хвиль. Однак у метало оксидних матеріалах діелектричного покриття і скляні підкладки, як правило,

використовуються в діапазоні VIS, не є прозорими в MWIR / LWIR. Відповідні прозорі субстрати для MWIR/LWIR включають Si, Ge, сапфір і ZnSe і багато інших, але історично, матеріали покриття для цих областей часто можна наносити тільки методами випаровування, що робить їх менш стійкими. Нещодавно розроблені методи розпилення, що дозволяють брати в облогу прозорі для інфрачервоного випромінювання матеріали, дозволили створити більш надійні оптичні фільтри. Ці нові довговічні напилювані матеріали дозволяють наносити покриття і наносити їх у вузьких смугах пропускання (<5 відсотків від центральної довжини хвилі).

Традиційно інфрачервоні газові сенсорні системи були більш дорогими, ніж електрохімічні системи. Однак зі зростанням доступності недорогих MWIR-датчиків і поліпшеннями в MWIR «газових смугових» оптичних фільтрах - знижується вартість; поліпшена доступність; і підвищена селективність, довговічність і доступність - очікується, що потреби в газових сенсорах NDIR будуть і надалі значно зростати. Нові вимоги до цих газовим сенсорам будуть продовжувати з'являтися у міру їх поширення у всіх сферах життя суспільства.

Вибір ІЧ-фільтра, включаючи довжину центральної хвилі (CWL), половину пропускну здатності потужності (HPBW: 50% від піку коефіцієнту пропускання), мінімальна передача та блокування дуже залежать від газу, який слід виявити, оптичної системи в яких будуть використовуватися сповіщувачі та необхідні показники роботи над температурою.

Зокрема, форма смугових фільтрів, матеріал підкладки та HPBW - це драйвери продуктивності, які необхідно враховувати в будь-якій конструкції датчиків газу.

Стандартні фільтри вузької смуги (NBP) нанесені на кремнієві підкладки, товщиною 0,4 - 0,7 мм. Блокування є гарантовано до 10 мкм для всіх фільтрів до 6 мкм (CWL). Для вище 6 мкм CWL-фільтрів блокування гарантується до хвилі в 13 мкм.

2.2.1. Інфрачервоні напівпровідникові фільтри

Напівпровідникові фільтри – це суворо не фільтри тонкої плівки, а фільтри поглинання, спираючись на їх електронну смугу будови.

У внутрішньому напівпровіднику смуга провідності порожня, а валентна зона повністю заповнена. Лише невеликий проміжок розділяє дві смуги. Якщо падаючий фотон має більше енергії, ніж цей проміжок, він здатний підняти електрон який виходить з валентної зони в зону провідності і, таким чином, поглинається.

Однак, оскільки дозволені рівні у валентній смузі повністю заповнені, електрони не можуть поглинати його і фотон передаватиметься. Це різка зміна від поглинання до передачі, що відбувається в точці довжини хвилі, що відповідає енергетичному проміжку, відома як внутрішній край.

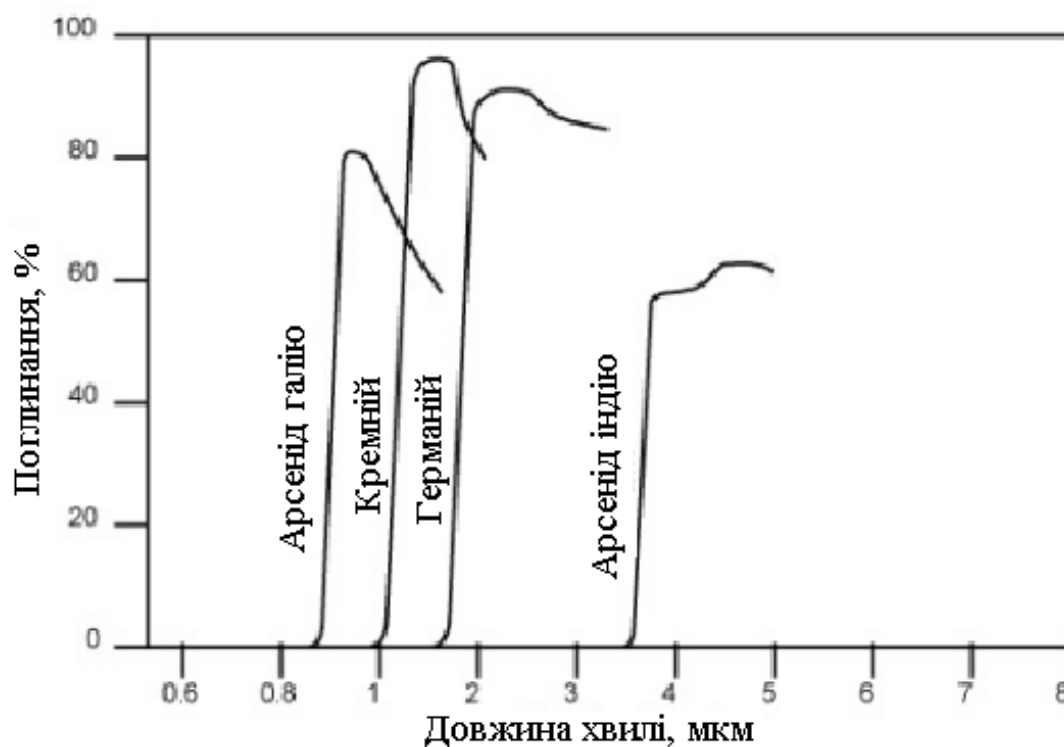


Рисунок 2.2.1 - Спектальна залежність при використанні Н/П фільтрів

Для використання напівпровідника в якості оптичного фільтра необхідно вирішити дві проблеми. По-перше, завжди є залишкове вільне поглинання носія в області проходу, по-друге, високий показник заломлення напівпровідників втрати віддзеркалення на поверхні досить великі. Перша складність долається за допомогою тонкого шматочка дуже чистого матеріалу, другий шляхом нанесення на поверхню антивідбивного покриття.

Напівпровідникові фільтри мають довгохвильові характеристики і складаються з покритих оптично відполірованих дисків напівпровідників, часто встановлених у тримачах для захисту. Через дуже високе поглинання в області зупинки, вони особливо корисні в ІЧ-решітках монохроматорах для усунення спектрів вищого порядку, які є особливо клопітні, коли використовуються джерела високої температури.

Наведені нижче ІЧ напівпровідникові фільтри доступні кільцевими, встановленими діаметром приблизно 25 мм як стандартні вироби. Залежно від використовуваного матеріалу, їх можна використовувати для наступних довжин хвиль:

- GaAs - 5% розріз: 900 нм
- Si - 5% розріз: 1040 нм
- Ge - 5% розріз: 1700 нм
- InAs - 5% розріз: 3600 нм

2.2.2. ІЧ-фільтри довгого проходу

Довгопрохідні інфрачервоні фільтри, на відміну від напівпровідникових фільтрів, побудовані із штабелів тонких шарів. Відхилення ОД 3 в діапазоні придушення не настільки високе, як у напівпровідникових фільтрах, але воно має перевагу у вільному виборі положення схилу:

- Положення краю: кожна довжина хвилі між 1 мкм і 20 мкм (при передачі 5%).
- Передача: 60% - 80% в пропускній смузі, 0,1% або менше в області відсікання. Область відсікання поширюється на рентгенівський діапазон. Полоса пропускання поширюється щонайменше вдвічі на довжину хвилі краю.
- Розмір: стандартні фільтри мають діаметр 25,4 мм і діафрагму > 21 мм. Інші розміри доступні за запитом. Також можуть бути виготовлені квадратні конструкції, що починаються з 2мм x 2мм, і круглі ІЧ-довгопрохідні фільтри діаметром до 100 мм.

2.2.3. ІЧ-смугові фільтри

Діелектричні смугові фільтри відповідно до специфікацій доступні в діапазоні довжин хвиль від 1,0 мкм до 20,0 мкм.

Вузькі смугові фільтри призначені для ізоляції вузької області інфрачервоного спектру. Це здійснено з використанням складного процесу конструктивних та руйнівних втручань. Вузькі смугові фільтри мають пропускну здатність (вимірюється на рівні пікового рівня пропускання) менше 6% від значення довжини хвилі.

Фільтри демонструють високу пікову пропускну здатність (зазвичай більше 60%) у поєднанні з високим загасанням, рівні за межами смуги пропускання (як правило, менше 0,1%).

Смугові фільтри призначені для виділення відносно широкої спектральної смуги. Вони класифікуються за наявності ширини смуги (виміряні на рівні пікового рівня пропускання) між 6% та 13% від значення довжини центральної хвилі.

При виробництві ширина смуги може бути виражена у відсотках від довжини центральної хвилі або може бути задана в мкм. Фільтри демонструють високу пікову передачу у смузі пропускання (зазвичай більше 70%) і дуже низькі рівні передачі поза смугою пропускання (як правило, менше 0,1%).

2.2.4. Фільтри на фотонних кристалах

Фотонні кристали(ФК) – це структури, які характеризуються періодичною зміною діелектричної проникності в просторі. Оптичні властивості ФК сильно відрізняються від оптичних властивостей суцільних середовищ. Поширення випромінювання всередині фотонного кристала завдяки періодичності середовища стає схожим на рух електрона всередині звичайного кристала під дією періодичного потенціалу. В результаті електромагнітні хвилі в фотонних кристалах мають зонний спектр і координатну залежність, аналогічну квазіімпульсу електронів в звичайних кристалах. При певних умовах в зонної структурі ФК утворюються щілини, аналогічні забороненим електронним зонам в природних кристалах. Залежно від конкретних властивостей (матеріалу елементів, їх розміру та періоду решітки) в спектрі ФК можуть утворюватися як повністю заборонені по частоті зони, для яких поширення випромінювання неможливо незалежно від його поляризації і напрямки, так і частково заборонені (стоп-зони), в яких поширення можливо лише в виділених напрямках.

Фотонні кристали цікаві як з фундаментальної точки зору, так і для численних додатків. На основі фотонних кристалів створюються і розробляються оптичні фільтри, хвилеводи (зокрема, в волоконно-оптичних лініях зв'язку), пристрої, що дозволяють здійснювати управління тепловим випромінюванням, на основі фотонних кристалів були запропоновані конструкції лазерів зі зниженим порогом накачування.

Крім зміни спектрів відбиття, проходження і поглинання метало-діелектричні фотонні кристали володіють специфічною щільністю фотонних станів. Змінена щільність станів може істотно впливати на час життя збудженого стану атома або молекули, поміщених усередину фотонного кристала, і, отже, змінювати характер люмінесценції. Наприклад, якщо частота переходу в молекулі-індикаторі, що знаходиться в фотонному кристалі, потрапить в заборонену зону, то люмінесценція на цій частоті буде подавлена. ФК діляться на три типи: одновимірні, двовимірні і тривимірні.

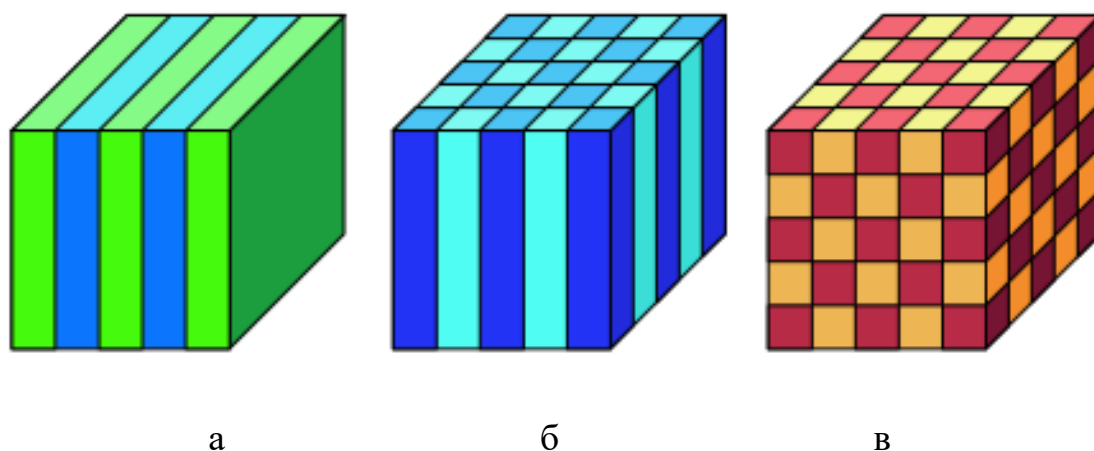


Рисунок 2.2.2 - Одновимірні(а), двовимірні(б) і тривимірні(в) фотонні кристали.

Різні кольори відповідають матеріалам з різними значеннями діелектричної проникності[20]

Одновимірними є ФК з шарами, що чергуються, зробленими з різних матеріалів.

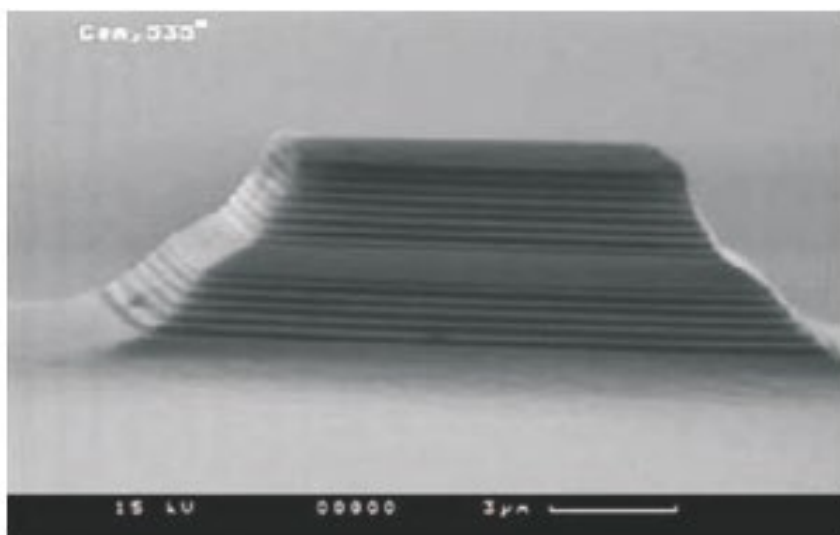


Рисунок 2.2.3 - Електронний знімок одновимірного ФК, що був використаний у лазері як брегівське багатошарове дзеркало[20]

Двовимірні ФК можуть мати більш різноманітні геометрії. До них, наприклад, можна віднести масиви нескінченних по довжині циліндрів (їх поперечний розмір багато менше поздовжнього) або періодичні системи циліндричних отворів.

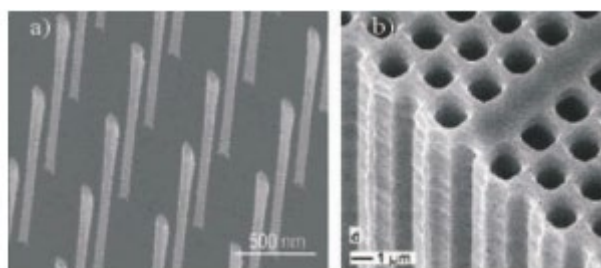


Рисунок 2.2.4 - Електронні знімки, двовимірного прямого і зворотного ФК з трикутними ґратками[20]

Структури тривимірних ФК доволі різноманітні. Найбільш поширеними в цій категорії є штучні опали – впорядковані системи сферичних розсіювачів. Розрізняють два основних типи опалів: прямі і зворотні опали. Перехід від прямого опала до зворотного опалу здійснюється заміною всіх сферичних елементів

порожнинами (як правило, повітряними), в той час як простір між цими порожнинами заповнюється будь-яким матеріалом.

Нижче представлено поверхню ФК, що представляє собою прямий опал з кубічної ґратами на основі самоорганізованих сферичних мікрочастинок полістиролу.

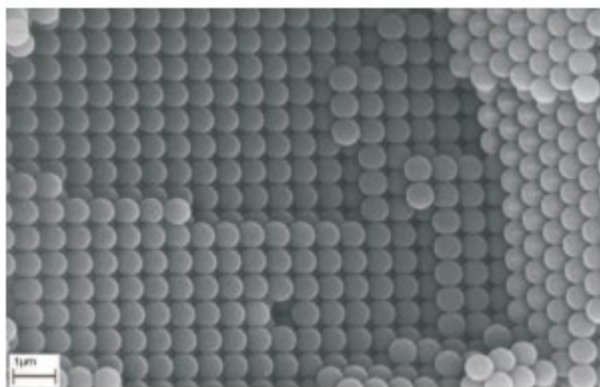


Рисунок 2.2.5 - Внутрішня поверхня ФК з кубічними ґратками на основі самоорганізованих сферичних мікрочастинок полістиролу [20]

Розглянемо способи виготовлення фотонних кристалів. Застосування ФК на практиці істотно обмежується відсутністю універсальних і простих методів їх виготовлення. У наш час реалізовано декілька підходів до створення ФК. Нижче описані два основні підходи.

Першим з них є так званий метод самоорганізації або «самозбирання». При самостійній збірці фотонного кристала використовуються колоїдні частинки (найпоширенішими є монодисперсні кремнієві або полістиролові частки), які знаходяться в рідині і в міру випаровування рідини осідають в обсязі. У міру їх "осадження" один на одного, вони формують тривимірний ФК і впорядковуються, в залежності від умов, в кубічну гранецентровану або гексагональну кристалічну решітку. Цей метод досить повільний, формування ФК може зайняти кілька тижнів. Також, до його недоліків можна віднести неможливість точного контролю відсотка появи дефектів в процесі осаження.

Однією з різновидів методу самоорганізації є так званий стільниковий метод. Цей метод передбачає фільтрування рідини, в якій знаходяться частинки, через малі пори, і дозволяє формувати ФК зі швидкістю, яка визначається швидкістю течії рідини через ці пори. У порівнянні зі звичайним методом осадження вказаний спосіб є набагато швидшим, однак і відсоток появи дефектів при його використанні є вищим.

До переваг описаних методів можна віднести той факт, що вони дозволяють формувати зразки ФК великих розмірів (площею до кількох квадратних сантиметрів).

Другим найбільш популярним методом виготовлення ФК є метод травлення. Різні методи травлення, як правило, застосовуються для виготовлення двовимірних ФК. Ці методи засновані на застосуванні маски з фоторезисту (яка задає, наприклад, масив півсфер), сформованої на поверхні діелектрика або металу і задає геометрію області травлення. Ця маска може бути отримана за допомогою стандартного методу фотолітографії, за яким безпосередньо слід хімічне травлення поверхні зразка з фоторезистом. При цьому, відповідно, в областях знаходження фоторезисту, відбувається травлення поверхні фоторезисту, а в областях без фоторезисту - травлення діелектрика або металу. Процес триває до тих пір, поки вода не досягне встановленої глибини травлення, після чого фоторезист змивається.

Недоліком вказаного методу є використання процесу фотолітографії, найкраще просторове вирішення якої визначається критерієм Релея. Тому цей метод підходить для створення ФК із забороненою зоною, що лежить, як правило, в ближній інфрачервоній області спектра. Найчастіше, для досягнення потрібного дозволу використовується комбінація методу фотолітографії з літографією за допомогою електронного пучка. Даний метод є дорогим, але високоточним методом для виготовлення квазідвовимірних ФК. У цьому методі фоторезист, який змінює свої властивості під дією пучка електронів, опромінюється в певних місцях для формування просторової маски. Після опромінення частина фоторезисту змивається, а частина, що залишилася використовується як маска для травлення в

подальшому технологічному циклі. Максимальна роздільна здатність цього методу становить близько 10 нм.

Нижче представлена (рис.2.2.6) зонна структура ФК, що має геометрію опала. Видно, що цей ФК має повну заборонену зоною на довжині хвилі близько 1.5 мкм і однієї стоп-зоною, з максимумом відображення на довжині хвилі 2.5 мкм. Змінюючи час травлення кремнієвої матриці на одному з етапів виготовлення інверсного опала і тим самим, варіюючи діаметр сфер, можна домогтися локалізації забороненої зони в певному діапазоні довжин хвиль. Структура з подібними характеристиками може бути використана в телекомунікаційних технологіях. Випромінювання на частоті забороненої зони може локалізуватися всередині обсягу ФК, а при наданні необхідного каналу поширюватися фактично без втрат. Такий канал може бути сформований, наприклад, шляхом видалення елементів фотонного кристала уздовж деякої лінії. При згинанні каналу електромагнітна хвиля також буде змінювати напрямок руху, повторюючи форму каналу. Таким чином, такий ФК передбачається використовувати в якості передавального вузла між випромінюючим пристроєм і оптичним мікрочіпом, що здійснює обробку сигналу.

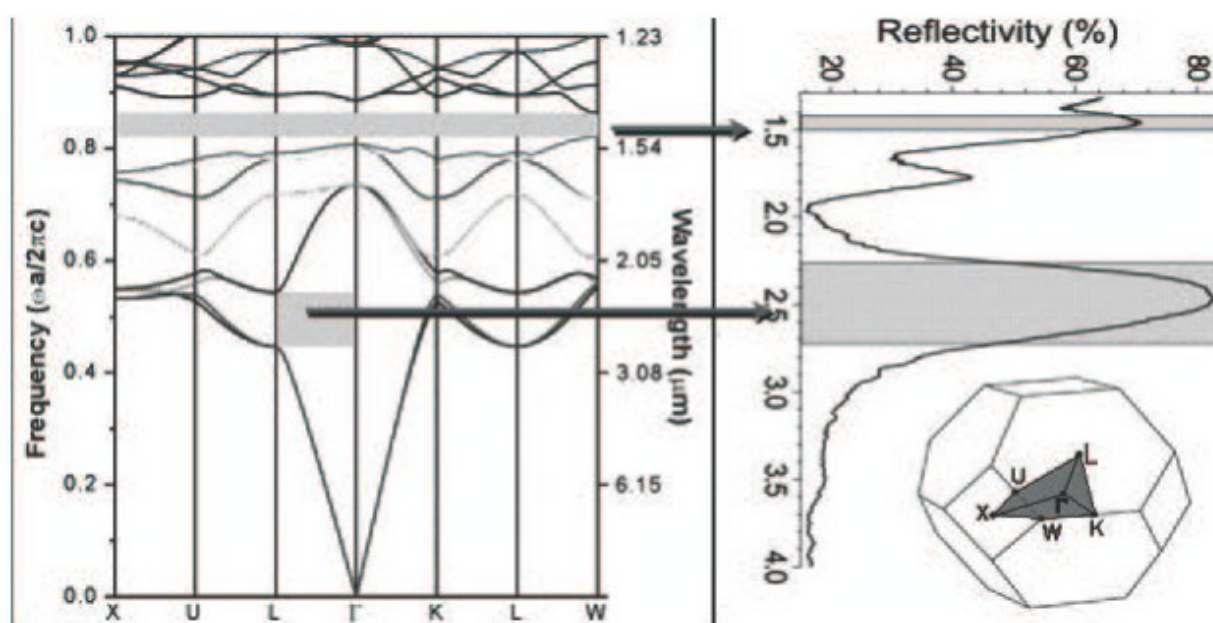


Рисунок 2.2.6 - Порівняння спектру відображення в напрямку ΓL , виміряного експериментально, і зонної структури, розрахованої методом

розкладання по плоским хвилям, для інверсного кремнієвого (Si) опала з кубічної гранецентрированої ґратами (на вкладці зображена перша зона Бріллюена).

Об'ємна частка кремнію 22%. Період решітки 1.23 мкм[20]

Перспективним напрямком сучасної оптики є управління випромінюванням за допомогою фотонних кристалів. Зокрема, в Лабораторії Сандії досліджувалися ФК типу «колоди» з метою досягнення високої селективності випромінювання металевих фотонних кристалів в ближньому інфрачервоному діапазоні, одночасно з сильним придушенням випромінювання в середньому ІЧ діапазоні (<20мкм). У цих роботах було показано, що для таких ФК випромінювання в середньому ІЧ діапазоні сильно пригнічений через наявність в спектрі ФК повної фотонної щілини. Однак якість повної фотонної щілини падає з ростом температури через збільшення поглинання в вольфрамі, що призводить до низької селективності випромінювання при високих температурах.

За законом Кірхгофа для випромінювання в тепловому рівновазі, випромінювальна здатність сірого тіла (або поверхні) пропорційна його поглинальній здатності. Тому для отримання інформації про випромінювальну здатність металевих ФК можна досліджувати їх спектри поглинання. Для досягнення високої селективності випромінює структури у видимому діапазоні (400 - 700 нм), що містить ФК, необхідно підібрати такі умови, при яких, поглинання у видимому діапазоні велике, а в ІЧ - придушене.

2.3. Розгляд ІЧ детекторів

Інфрачервоний детектор являє собою детектор, який реагує на інфрачервоне (ІЧ) випромінювання. Два основних типи детекторів – це термічний і фотонний (фотоприймачі).

Теплові ефекти ІЧ-випромінювання, що трапляються, можна прослідкувати через багато температурних явищ. Болметри та мікроболметри засновані на зміні опору. Термопари використовують термоелектричний ефект. Голай-клітини слідує за термічним розширенням. В ІЧ – спектрометрів на застосуванні піроелектричних детекторів є найбільш поширеними.

Час відгуку та чутливість фотонних детекторів можуть бути набагато більшими, але зазвичай їх потрібно охолодити, щоб зменшити тепловий шум. Матеріали в них – напівпровідники з вузькими зазорами. Інцидентні ІЧ фотони можуть викликати електронні збудження. У фотопровідних детекторах контролюється питомий опір елемента детектора. Фотоелектричні детектори містять *p-n*-перехід, на якому при освітленні з'являється фотоелектричний струм.

2.3.1. Інфрачервоний фотопровідний детектор PbSe

Інфрачервоне світло на довжинах хвиль, що інколи перевищує 5 мкм, можна виявити за допомогою детекторів сольових свинців, наприклад, що містять селенід свинцю (PbSe) або сульфід свинцю (PbS). Такі пристрої не виготовлені з епітаксіальним ростом, як, наприклад, фотодіоди InGaAs, а швидше шляхом осадження тонких полікристалічних плівок. Вони є фотопровідниками (фоторезисторами), а не фотодіодами, тобто не містять *p-n* переходу, але виявляють зменшення електричного опору, спричиненого падаючим світлом, що індукує внутрішньополосні переходи. Детектори солі свинцю можуть використовуватися

при кімнатній температурі, хоча кращі показники можливі при охолоджених детекторах. Охолодження не тільки зменшує темновий струм і, таким чином, покращує чутливість, але і знижує енергію діапазону зазорів, так що світло з більшою довжиною хвилі можна виявити.

Інша детекторна технологія, яка широко використовується, базується на фоторезисторах, що містять телурид кадмію ртуті ($\text{MCT}, \text{Hg x Cd } 1 - \text{x Te}$). Через параметр складу (тобто вміст ртуті) енергія смуги може бути налаштована в широкому діапазоні. Таким чином можливе виявлення на досить великій довжині хвилі (частково понад 12 мкм). Детектори МСТ зазвичай охолоджуються, і вони можуть бути зроблені у вигляді датчиків зображення (або масивів фокусної площини), які в основному використовуються для тепловізуалізації.

Для ще більших довжин інфрачервоної хвилі навіть у далекій інфрачервоній діапазоні дещо понад 200 мкм – є детектори кремнію та германію з високим легуванням. Такі довгохвильові інфрачервоні детектори є зовнішніми (домішковими) напівпровідниковими пристроями, тобто вони покладаються на додаткові енергетичні рівні, що вводяться домішками, такими як миш'як, мідь, золото або індій. Їх потрібно охолодити до дуже низьких температур (наприклад, 4К з рідким гелієм), оскільки теплове збудження інакше маскує будь-які сигнали інфрачервоного світла.

Іншою технологією є технологія квантових інфрачервоних фотоприймачів (QWIP) на основі GaAs/AlGaAs . Вони охолоджують фотопровідні детектори, що містять кілька квантових лунок, де замість міжбанкових переходів використовують переходи, що включають квантові добре зв'язані стани та, можливо, континуальні стани. Наприклад, QWIP на основі GaAs/AlGaAs можуть забезпечити чутливість близько 6–20 мкм, але часто у відносно вузьких спектральних областях (визначених використаними переходами). При низьких робочих температурах, наприклад 50К, вони мають деякі переваги перед МСТ-детекторами, особливо для виготовлення детекторних масивів. Існують також квантові точкові інфрачервоних

фотоприймачів (QDIP), де використовуються квантові точки замість квантових лунок.

Деякі матеріали інфрачервоних детекторів містять такі небезпечні речовини, як свинець, кадмій та ртуть. Тому їх використання все більше обмежується, наприклад, європейськими регламентами RoHS. Однак тимчасові винятки існують для конкретних застосувань, де важко знайти замітники.

Принцип роботи детекторів PbSe заключається у швидкому реагуванні, саме тому вони добре підходять для швидкісних застосувань, таких як, виявлення гарячих точок. Вони також використовуються в аналізі медичного газу (CO_2 вимірюванні), вимірювання викидів в промисловій сфері і автомобільної промисловості, а також при вимірюванні вологи і вуглеводнів.

2.3.2. Термопара

Термопара – це тепловий детектор, який виявляє постійні світлові сигнали. Широкосмугові термопари застосовуються в лазерному вимірюванні потужності, загальному вимірюванні випромінювання, вимірюванні абсолютної температури та газоаналізаторах.

Як тепловий детектор, термопара чутлива у всьому діапазоні довжин хвиль (тобто від рентгенівського до далекого інфрачервоного випромінювання). Єдина вимога - поглинати випромінювання для нагрівання детектора. Цей ефект покращується нанесенням чорного шару, а спектральна чутливість рівна від УФ до далекого ІЧ-діапазону (виняток: серія ST). Однак застосування найбільш поширене в інфрачервоному спектральному діапазоні.

Так як, термопара – це детектор постійного струму, вона реагує на світло постійного струму і несприйнятлива до мікрофонії. Шум не залежить від частоти; він визначається тепловим шумом опору детектора (шум Джонсона). Типові

програми включають безконтактне вимірювання температури, вимірювання газу та вимірювання потужності (при низьких рівнях потужності).

Принцип роботи термопар заснований на ефекті Зеебека. Його попередником була термопара, яка складалася із стику між двома металевими проводами з різними значеннями термоелектричної напруги. Цей ефект був виявлений у 1821 р. Обидва металевих дроти виробляють напругу, пропорційну різниці температур (тобто вона завжди вимірюється відносно). За допомогою послідовного з'єднання декількох пар чутливість може бути підвищена. Виробництво тонкоплівкових термомар із перекриттями сурмових та вісмутових плівок займається з 1934 року.

Традиційні термопары Dexter (1M, 2M тощо) складаються з контактних пар сурми та вісмуту, в яких чутливі до випромінювання «гарячі» контакти наносяться на почорнілу плівку. "Холодні" опорні контакти розташовані на масивній керамічній підкладці, яка виконує роль тепловідводу. При такому розташуванні найкращий D^* досягається в термопарах. Обмежена технологія виготовлення, потрібно приймати зміни параметрів приблизно 30% в серійному виробництві.

S-лінія детекторів заснована на фосфоровому полісиліконі та золотих контактах, які мають значно більшу теплову потужність, ніж контакти сурми та вісмуту. Тобто вони більш чутливі (наближеним коефіцієнтом 5). Однак це відбувається за рахунок більшого опору, а отже, і більшого рівня шуму. З одного боку, має сенс використовувати лише невеликі детектори; насправді найбільший детектор Si в даний час становить 1,5 мм x 1,5 мм.

2.3.3. Піроелектричний детектор

Піроелектричні детектори — це датчики світла, засновані на піроелектричному ефекті. Вони широко використовуються для виявлення лазерних

імпульсів (а не безперервного хвилі світла), часто в інфрачервоній спектральній області та з можливістю дуже широкого спектрального відгуку. Піроелектричні детектори використовуються як центральні частини багатьох лічильників оптичної енергії і, як правило, працюють при кімнатній температурі (тобто не охолоджуються). У порівнянні з лічильниками енергії на основі фотодіодів вони можуть мати набагато ширший спектральний відгук.

Існують різні інші програми піроелектричних датчиків, наприклад виявлення пожежі, супутникове інфрачервоне виявлення та виявлення людей за допомогою їх інфрачервоного випромінювання (детектори руху).

Розглянемо основний принцип роботи піроелектричного детектора. Піроелектричний детектор містить шматочок фероелектричного кристалічного матеріалу з електродами з двох сторін – схожий на конденсатор. Один з цих електродів має чорне покриття (або оброблювану поверхню, що поглинає метал), яке піддається впливу випромінювання. Світло, що падає, поглинається на покритті і, таким чином, також викликає деяке нагрівання кристала, оскільки тепло проводиться через електрод в кристал. В результаті кристал виробляє деяку піроелектричну напругу; можна електронним шляхом виявити цю напругу або альтернативно струм, коли напруга підтримується постійною. При постійній оптичній потужності цей піроелектричний сигнал згодом блякне; отже, пристрій не підходить для вимірювання інтенсивності випромінювання безперервної хвилі. Натомість такий детектор зазвичай використовується зі світловими імпульсами; у цьому випадку отримують біполярну структуру імпульсу, де спочатку отримують напругу в одному напрямку, а після імпульсу - напругу в протилежному напрямку.

У зв'язку з цим принципом роботи піроелектричні детектори належать до теплових сповіщувачів: вони не реагують безпосередньо на випромінювання, а лише на вироблене тепло.

У простому поясненому вигляді детектор був би відносно чутливий до коливань температури навколишнього середовища. Тому часто використовується

додатковий компенсуючий кристал, який піддається фактично однаковим температурним коливанням, але не надходить на світло. Приймаючи різницю сигналів від обох кристалів, можна ефективно знизити чутливість до зовнішніх змін температури.

Теплові детектори є природними поліхроматичними, і потрібен фільтр для виявлення конкретних газів/довжин хвиль.

Одиночні довжини хвилі можуть бути виявлені лише за умови використання відповідних вузькосмугових фільтрів, оскільки без відповідних фільтрів піроелектричні детектори не змогли б навіть виявити один газ.

Залежно від застосування фільтр/вікно визначає спектральну чутливість піроелектричного елемента, що також забезпечує надійну герметичність.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОКОНТРОЛЕРА

Мікроконтролер призначений для обробки інформації, а також можливої її передачі на, наприклад, смартфон, або комп'ютер за допомогою Bluetooth або у мережу, за допомогою Wi-Fi. Було вирішено обрати мікроконтролер ESP32.

ESP32 – серія недорогих мікроконтролерів з низьким енергоспоживанням. Являють собою систему на кристалі з інтегрованим Wi-Fi і Bluetooth контролерами і антенами. У серії ESP32 використовується Мікроконтролерне ядро Tensilica Xtensa LX6 в варіантах з двома і одним ядром. В систему інтегрований радіочастотний тракт: Балун (симетруючий трансформатор), вбудовані антенні комутатори, радіочастотні компоненти, малошумний підсилювач, підсилювач потужності, фільтри і модулі управління живленням. ESP32 створений і розроблений компанією Espressif Systems, китайською компанією, розташованої в Шанхаї, а виробляється компанією TSMC по техпроцесу 40 нм. Серія є наступником мікроконтролерів ESP8266.

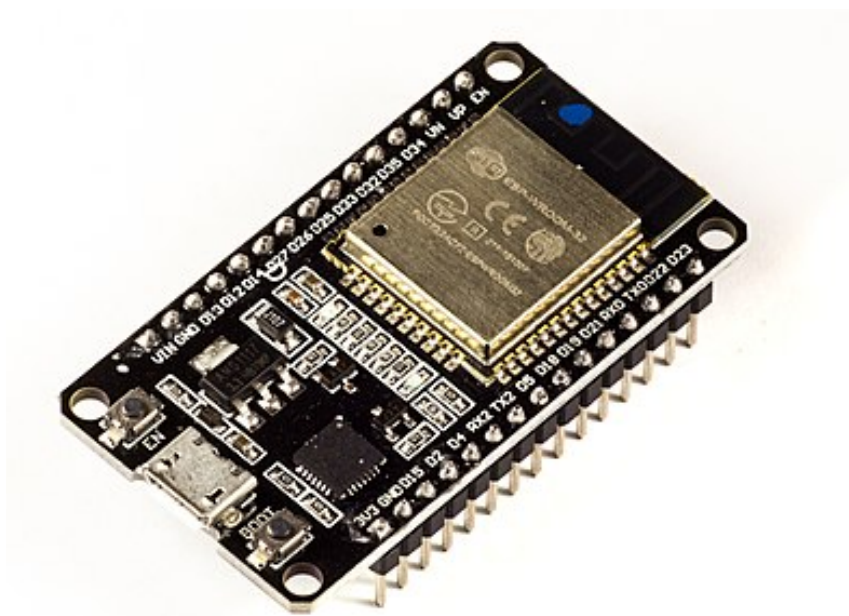


Рисунок 3.1 - Фото мікроконтролера ESP32[17]

Необхідно відзначити наступні особливості мікроконтролера ESP32:

Складові ESP32:

- Мікроконтролер і управління
- Tensilica Xtensa LX6 двоядерний (або одноядерний) 32-розрядний процесор, з тактовою частотою 160 або 240 МГц і продуктивністю до 600 DMIPS (Dhrystone MIPS)
- Співпроцесор з ультранизким енергоспоживанням
- Пам'ять: 520 КБ пам'яті SRAM
- Wi-Fi: 802.11 b / g / N
- Bluetooth: v4.2 BR / EDR and BLE

Периферійні інтерфейси ESP32:

- 12-розрядний АЦП до 18 каналів
- 2×8 біт ЦАП
- $10 \times$ портів для підключення ємнісних датчиків (що вимірюють ємність GPIO)
- $4 \times$ SPI майстер-інтерфейсу (провідні пристрої)
- $2 \times$ I²S майстер-інтерфейсу
- $2 \times$ I²C майстер-інтерфейсу
- $3 \times$ UART інтерфейсу
- SD / SDIO / CE-ATA / MMC / eMMC хост-контролер
- SDIO / SPI слейв-контролери (ведені пристрої)
- Ethernet MAC interface з виділенням DMA і IEEE 1588 Precision Time Protocol support
- CAN bus 2.0
- ІК пульт дистанційного керування (передавач / приймач, до 8 каналів)
- Можливість підключення двигунів і світлодіодів через ШІМ-вихід

- Аналоговий передпідсилювач низького енергоспоживання

Параметри безпеки ESP32:

- Підтримуються всі функції безпеки стандарту IEEE 802.11, у тому числі WPA, WPA/WPA2 і WAPI
- безпечне завантаження
- Шифрування флеш-диска
- 1024-бітний ключ, до 768 біт для клієнтів
- Криптографічне апаратне прискорення: AES, SHA-2, RSA, криптографії на основі еліптичних кривих (ECC), апаратний генератор випадкових чисел при включеному WiFi або Bluetooth, інакше використовується генератор псевдовипадкових чисел

Управління енергоспоживанням ESP32:

- Лінійний регулятор з низьким рівнем падіння напруги
- Індивідуальне енергоспоживання для RTC
- споживання 5-2,5 мкА в режимі «глибокий сон»
- Пробудження по перериванню від GPIO, таймера, вимірюванню АЦП, переривання ємнісного сенсорного датчика

Робоча напруга: від 2,2 в до 3,6 В

Робоча температура: від -40 ° С до + 125 ° С

Максимальна швидкість передачі даних 150 Мбіт / с при 11n HT40, 72 Мбіт / с при 11n HT20, 54 Мбіт / с @ 11g, і 11 Мбіт / с при 11b

Максимальна потужність передачі 19,5 дБм @ 11b, 16,5 дБм @ 11 г, 15,5 дБм

Мінімальна чутливість приймача-98 дБм

Стійка пропускну здатність UDP 135 Мбіт/с

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Так як, метою роботи є вдосконалення індикаторного пристрою виміру концентрації CO₂, а саме зменшення вартості пристрою, за рахунок використання компонентів, що зменшують собівартість та є не менш ефективними. Було проведено аналіз, на базі якого визначено приблизені характеристики проектного пристрою, отриманні значення наведені у таблиці:

Таблиця.4.1 - Параметри проектного пристрою

Рекомендовані параметри пристрою	
Робоча напруга	4.5 В-5.5 В
Середній струм	менше 85 мА
Рівень перешкод	3.3 В
Час нагрівання	Приблизно 3 мин
Вихідний сигнал	ШИМ
	UART
	0.4 - 2 В
Час реакції	менше 90 с
Робоча температура	0-50 С
Робоча вологість	0-95% RH
Вага	15-30 г
Термін придатності	більше 5 років

Також на рис.4.1 зображено схему проектного пристрою для виміру концентрації CO₂ з урахуванням підключення до ESP32.

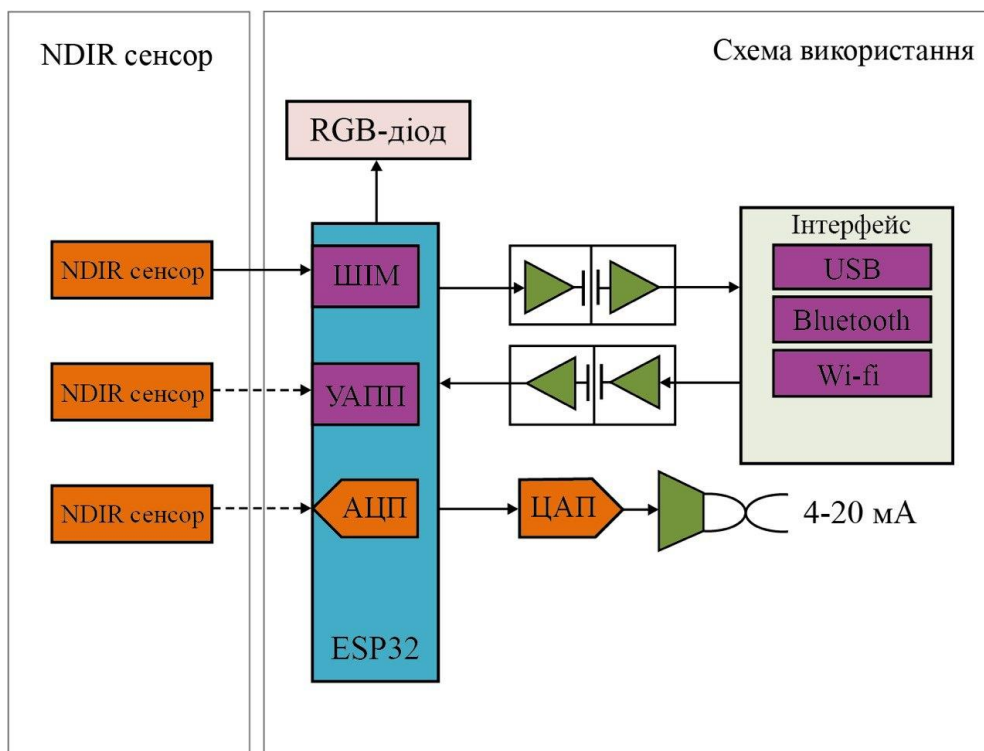


Рисунок 4.1 - Схема проектного пристрою
для виміру концентрації CO₂

Використовуючи мікроконтролер ESP32, можливо не тільки передавати значення на комп'ютер, а також передавати їх безпосередньо на смартфон, за допомогою Bluetooth, а також Wi-Fi. Це дає змогу зменшити витрати на екран для самого пристрою і додає зручності у користуванні приладом. Для індикації на самому пристрої було вирішено розмістити RGB – світлодіод, який сигналізує про стан забруднення повітря різними кольорами:

- Зелений – проміжок від 400 до 700 ppm – концентрація CO₂ яка є нормою для людини.
- Жовтий – проміжок від 700 до 1000 ppm - концентрація CO₂ яка є вище норми, але не критично, рекомендується провітрити приміщення
- Червоний – проміжок від 1000-2000 ppm - концентрація CO₂ яка є злоякісною для людини, і треба терміново провітрити приміщення.

Корпус приладу має вигляд:

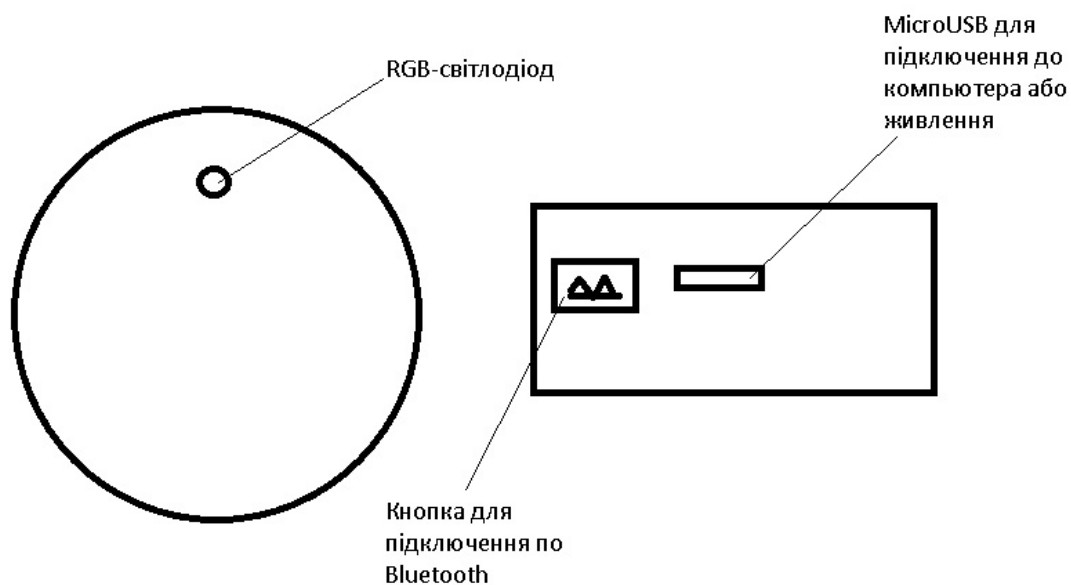


Рисунок 4.2 - Зразок корпусу та розміщення елементів

У якості детектора найбільш вигідним рішенням є інтегровані термопари від компанії «Ramsun», вони є у широкому доступі, та за малою ціною (приблизно 110 гривень за штуку, та приблизно 70 гривень партією).

RAMSUN



Рисунок 4.3 - Інтегрована термопара компанії «Ramsun»

Термопара від компанії «Ramsun» має внутрішній опір 84 кОм у кожному каналі. Внутрішній опір термопіляції 84 кОм і зовнішній 8,2 нФ конденсатор утворюють RC фільтр низьких частот пропускання з частотою обрізу -3 дБ:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 84 \text{ кОм} \cdot 8,2 \text{ нФ}} \approx 231 \text{ Гц} \quad (4.1)$$

Час встановлення крокової функції фільтра 84 кОм / 8,2 нФ до 22 біт становить приблизно:

$$\tau = 84 \text{ кОм} \cdot 8,2 \text{ нФ} \cdot \ln 2^{22} \approx 10,5 \text{ мс.} \quad (4.2)$$

Неінвертуючий підсилювач AD8629 встановлений на коефіцієнт підсилення 214,6 та частоту відсічення -3 дБ:

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 47 \text{ кОм} \cdot 15 \text{ нФ}} \approx 225,75 \text{ Гц} \quad (4.3)$$

Час відстоювання до 22 біт приблизно:

$$\tau = 47 \text{ кОм} \cdot 15 \text{ нФ} \cdot \ln 2^{22} \approx 10,75 \text{ мс} \quad (4.4)$$

Максимальна частота відсікання NDIR становить 5 Гц, а мінімальна ширина імпульсу напівциклу - отже, 100 мс. Час відстоювання до 22 біт становить приблизно $0,1 \times$ мінімальна ширина імпульсу відсікання.

Вплив температури навколишнього середовища. Термопара, як детектор відчуває температуру, поглинаючи випромінювання, але він також реагує на зміни температури навколишнього середовища, які можуть спричинити помилкові та оманливі сигнали. З цієї причини багато термопар мають в упаковці термістори.

Поглинання випромінювання пов'язане з кількістю молекул-мішеней у камері, а не абсолютним відсотком цільового газу. Тому поглинання описується законом ідеального газу при стандартному атмосферному тиску.

Необхідно записати дані про температуру як в калібрувальному, так і в стані вимірювання:

$$x_T = \frac{T}{T_{LOW}} x \quad (4.5)$$

де:

x - концентрація газу без компенсації температури.

T_{LOW} - температура в К при низькій і високій концентрації газу.

T - температура в К при відборі проб.

x_T - являє собою концентрацію газу при температурі T .

ІЧ-фільтр найважливіша, і на той же час, найдорожча складова газового аналізатора. Наприклад: компанія «iridian» пропонує свої фільтри, для різних довжин випромінювання (SWIR, MWIR та LWIR) за наступними цінами:


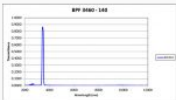
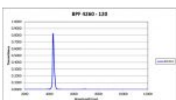
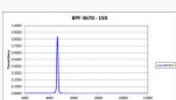
	2700	120	80	БНФ 2700-120	295,00 доларів США
	3460	140	80	БНФ 3460-140	295,00 доларів США
	4260	120	80	БНФ 4260-120	265,00 доларів США
	4670	150	80	БНФ 4670-150	265,00 доларів США

Рисунок 4.5 - Порівняння цін ІЧ-фільтрів

У середньому у діапазоні від 265 до 295 доларів США.

Для аналізу CO_2 потрібен фільтр для довжини хвилі 4,26 мкм, 2,7 мкм або 13 мкм в залежності від довжини випромінювання. Найкращим варіантом буде взяти середню довжину хвилі випромінювання – 4,26 мкм.

Як ми можемо бачити, вони коштують 265 доларів США, що зовсім не мала сума.

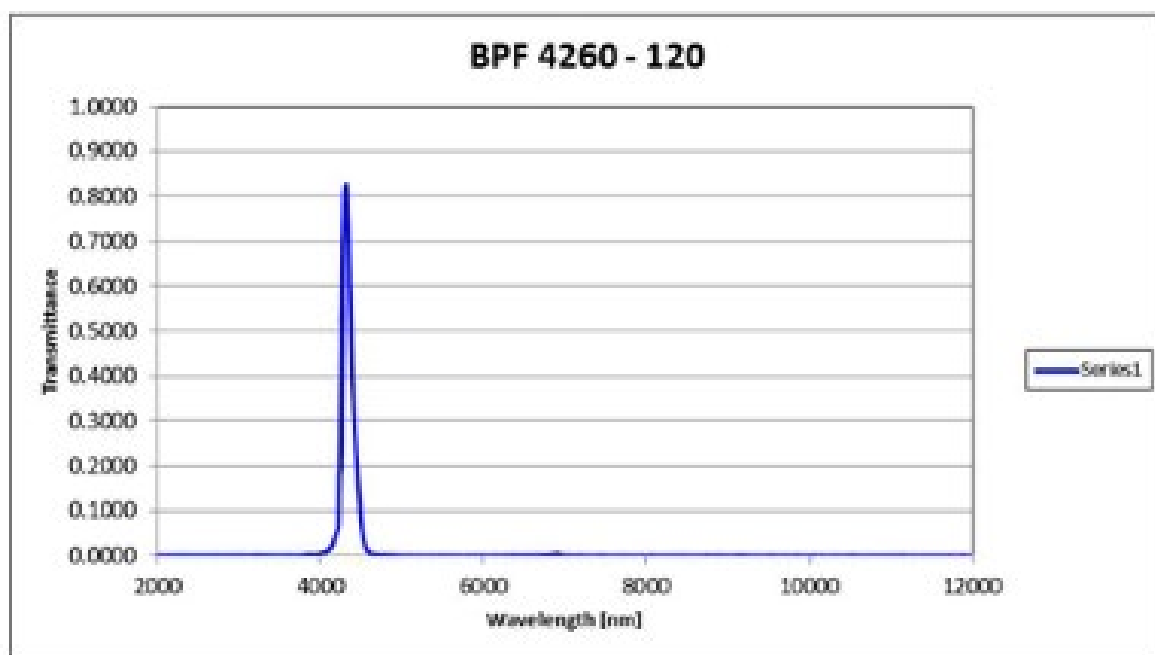


Рисунок 4.6 - Спектральна характеристика фільтра BPF 4260-120

Аналізуючи існуючі фільтри, є перспективним розвиток приладу, а саме розробка фільтра на фотонних кристалах, не дивлячись на вартість даного фільтра, його властивості, змінювати ширину забороненої зони зі зміною напруги, найкраще підходять для газоаналізаторів типу NDIR, бо при використанні лампи у якості джерела ІЧ-світла, а це широкосмугове джерело, це дає змогу змінювати ширину зони пропускання фільтра та відстежувати також гази, які знаходяться поряд з CO_2 у спектральному діапазоні.

Було обране джерело світла нитки - International Light Technologies MR3-1089, з відполірованим алюмінієвим відбивачем, якому потрібна напруга приводу

5,0 В при 150 мА для максимального випромінювання в інфрачервоному просторі та найкращих показників роботи системи. Ціна лампи приблизно 8-10\$. Тепло від лампи підтримує температуру оптичного відбивача вище, ніж навколишню, що корисно для запобігання конденсації у вологих середовищах.

Лампи розжарювання мають низький опір при холоді (вимкнено), що може спричинити сплеск струму в момент включення. Регулятор з функцією м'якого запуску корисний для вирішення цієї проблеми.

Регулятор напруги низького випадку MR3-1089 має програмований контакт, який може використовуватися для вводу/виводу загального призначення ESP32 для включення / відключення напруги лампи. Конденсатор плавного пуску 10 нФ забезпечує час пуску 12,2 мс, що становить приблизно $0,125 \times$ мінімальний час кроку відбивання 100 мс.

Струм напруги лампи (~ 150 мА) великий, тому необхідна ретельна схема та розташування для запобігання перемикання імпульсів лампи на приєднання до малих вихідних напруг термопар.

Драйвер лампи MR3-1089 поставляється безпосередньо від зовнішнього джерела живлення, підключеного до плати ESP32.

Підключення ESP32 та сенсора CO₂. Для підключення нам потрібно живити пристрій напругою 5 В і підключити його контактний контакт до штифта ESP32, який може зчитувати аналогові напруги.

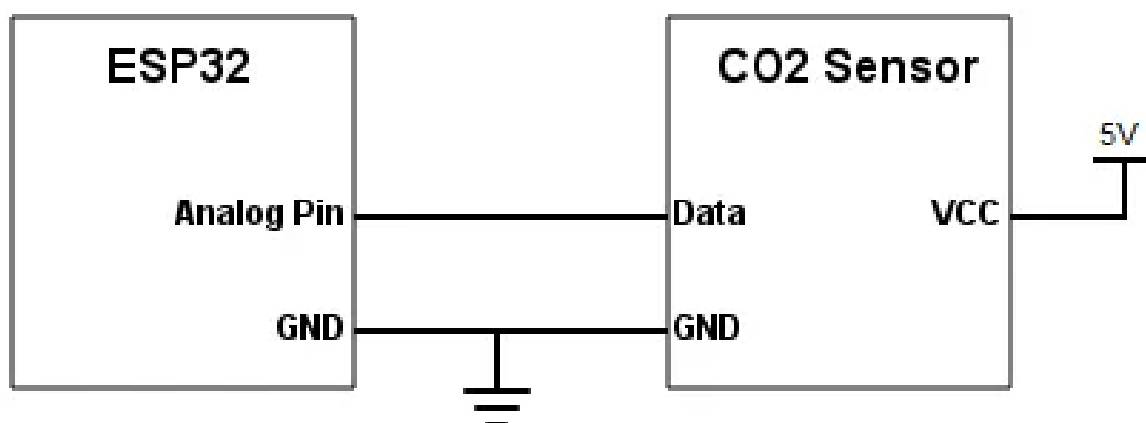


Рисунок 4.7 - Електронна схема підключення ESP32 та сенсора CO₂

Оскільки ESP32 інтегрує два АЦП 12 біт , це означає, що ми можемо отримати цифрові значення від 0 до 4095 для аналогових вимірювань напруги. Також ми можемо змінити бітову ширину між 9 і 12 бітами за допомогою функції `analogSetWidth`, було обране наступне значення бітової ширини – 12 біт.

Реалізація програмного коду для підключення ESP32 з сенсором CO₂. Код, що був написаний для отримання вимірів не потребує підключення додаткових бібліотек. Спочатку оголошується номер PIN-коду ESP32, який буде підключений до датчика як глобальної змінної, щоб полегшити зміни в майбутньому:

```
1 | int analogPin = 35;
```

Рисунок 4.8 - Фрагмент коду

Перейшовши до функції налаштування, необхідно відкрити послідовне з'єднання для виведення вимірювань.

```
1 | void setup()
2 | {
3 |   Serial.begin(115200);
4 | }
```

Рисунок 4.9 - Фрагмент коду

На основній петлі Arduino було оброблено вимірювання, які будуть виконуватися періодично.

Перше, що нам потрібно зробити, це отримати зчитування з аналогового штифта, підключеного до датчика. Для цього ми просто викликаємо функцію `analogRead`, передаючи у якості введення номер штифта, який ми визначили раніше.

```
1 | int adcVal = analogRead(analogPin);
```

Рисунок 4.10 - Фрагмент коду

Як було зазначено раніше, це відповідає значенню між 0 і 4095 (АЦП має 12 біт), яке необхідно перетворити на значення напруги. Припускаючи лінійну поведінку АЦП, ми можемо це зробити використовуючи пропорцію, як це видно нижче з рис 4.11.

```
1 | float voltage = adcVal*(3.3/4095.0);
```

Рисунок 4.11 - Фрагмент коду

Тепер, коли підраховано значення напруги, необхідно розглянути кілька випадків, які ми можемо знайти. Як зазначалося раніше, якщо ми отримуємо напругу 0 В, це означає, що з датчиком виникла певна проблема.

Якщо ми отримаємо напругу більше 0 В, але менше 0,4 В, то це означає, що датчик все ще знаходиться в процесі попереднього нагрівання. Під час цієї фази ми все ще не можемо отримати жодного вимірювання.

```

if(voltage == 0)
{
    Serial.println("A problem has occurred with the sens
}
else if(voltage < 0.4)
{
    Serial.println("Pre-heating the sensor...");
}
else
{
    // Measurement handling code
}

```

Рисунок 4.12 - Фрагмент коду

У випадку, якщо ми отримаємо напругу, рівне або більше 0,4 В, тоді нам потрібно перетворити її на значення концентрації CO₂.

Спочатку необхідно відняти до вимірюваної напруги поріг попереднього нагрівання, оскільки при виведенні датчика 0,4 В це відповідає концентрації CO₂ 0 проміле. Таким чином, нам потрібно зняти це зміщення з нашого вимірювання.

```

1 | float voltageDifference=voltage-0.4;

```

Рисунок 4.13 - Фрагмент коду

Оскільки співвідношення між вимірюваною напругою та концентрацією CO₂ є лінійним, доцільно застосувати іншу пропорцію.

```

| float concentration=(voltageDifference*5000.0)/1.6;

```

Рисунок 4.14 - Фрагмент коду

Наступним кроком можна вивести на екран як отриману концентрацію CO₂, так і виміряну напругу. Важливо відмітити, що напруга лише для ілюстрації, і оскільки ми використовуємо функцію друку без додаткових параметрів, це означає, що номер плаваючої точки буде надрукований лише з двома десятковими знаками.

Отриманні значення, показані на рис.4.15, та проводилися всередині закритого приміщення.

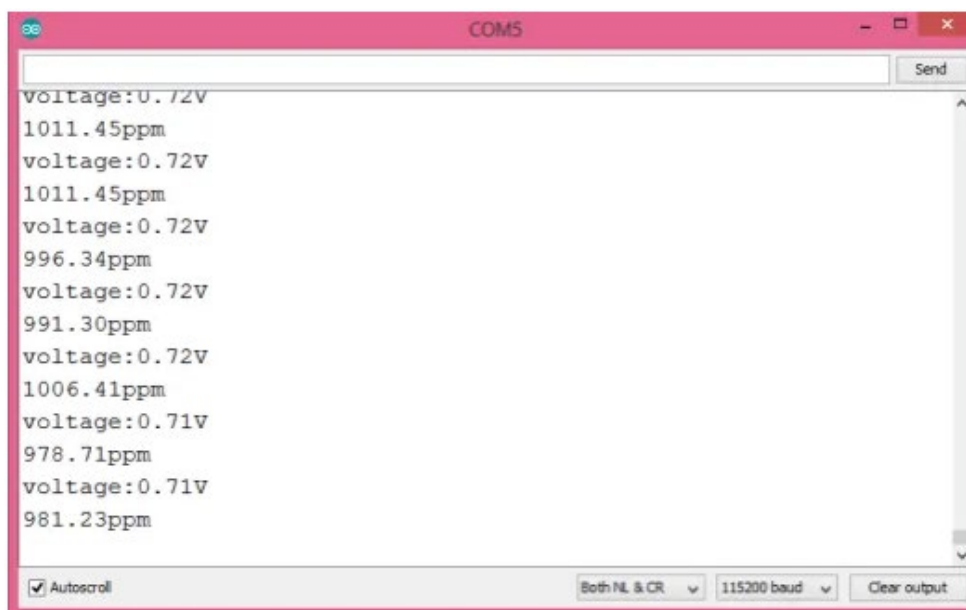


Рисунок 4.15 - Вимірювання проведені в умовах закритого приміщення.

На рис. 4.16 представлені вимірювання, проведені біля відкритого вікна. Як можна побачити, вимірювана концентрація CO2 значно знижується.

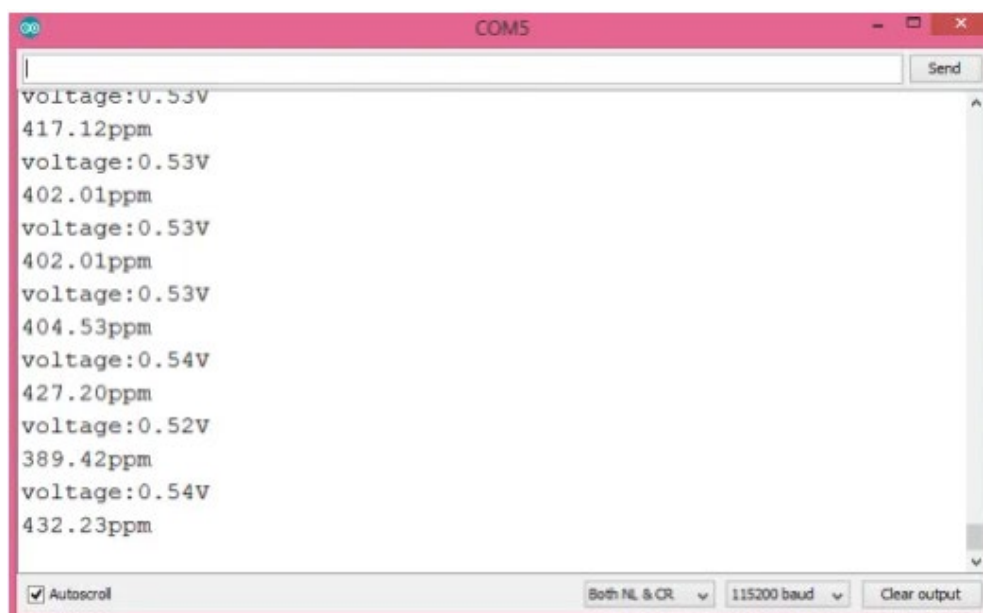


Рисунок 4.16 - Вимірювання, проведені в умовах з відкритим вікном.

Як було зазначено, була припущена лінійна поведінка для АЦП ESP32 і оскільки нелінійність не виправляється в API, вимірювані значення не дуже точні і можуть бути покращені.

ВИСНОВКИ

Моніторинг та підтримання оптимальної концентрації CO_2 є дуже важливими у різних сферах нашого життя, особливо у тих місцях, де якість повітря на пряму взаємодіє з нашим самопочуттям, а особливо на нашу продуктивність. Такими місцями можуть бути спортивні зали, офіси, домівка, аудиторії університету тощо. Газоаналізатори зустрічаються у нашому житті все частіше, через розробку більш доступніших датчиків. У цій роботі було розроблено пристрій, за собівартістю дешевше, ніж є на ринку, а отже зробили його доступнішим.

Провівши детальний аналіз компонентів, можна зробити деякі висновки:

- 1) Найпростішою та надійною технологією для вимірювання CO_2 є спектрометрія, а саме NDIR технологія.
- 2) Інфрачервоне джерело випромінювання, яке підходить для данної роботи – це інфрачервона лампа, хоч у неї менший час життя, це широкосмуговий випромінювач, який при подальшій модернізації приладу, можна використовувати для визначення не тільки газу CO_2 , а і інших газів. Також, ІЧ-лампи можна знайти у широкому діапазоні ціни/параметрів. А у випадку з MEMS випромінювачами та світлодіодами є декілька недоліків, таких як: ціна, вузький спектр випромінювання тощо.
- 3) Для подальшої модернізації приладу, краще взяти фільтр на фотонних кристалах, через його універсальність, а також технічний потенціал розвитку. Також, у роботі були вказані методи виготовлення фільтрів на основі фотонних кристалів.
- 4) У якості детектору було обрано термопару, через її доступність та параметри.
- 5) У цілому компоненти на готовий пристрій коштують приблизно 30-40\$ з урахуванням корпусу, мікроконтролера, датчика температури і вологості, а також самого CO_2 аналізатора за технологію NDIR.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вуглекислий газ та його вплив на живі організми. Режим доступу до ресурсу: http://ecounit.com.ua/artikle_101.html
2. Оптичні фільтри відкривають нові можливості. Режим доступу до ресурсу: <https://www.photonics.com/Unavailable.html?aspxerrorpath=/a56392>
3. Вимірювач CO₂ з даталогером. Режим доступу до ресурсу: <https://mysku.ru/blog/aliexpress/25137.html>
4. Субмініатюрні лампи для NDIR. Режим доступу до ресурсу: <https://www.intl-lighttech.com/specialty-light-sources/subminiature-t-34-and-t-1-ndir-lamps>
5. Недисперсійний інфрачервоний аналізатор. Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%80%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B9_%D0%B8%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80
6. Прилад для вимірювання концентрації CO₂ UNI-T A37. Режим доступу до ресурсу: <https://mysku.ru/blog/china-stores/74329.html>
7. Інфрачервоні світлодіодні елементи для зондування газу NDIR. Режим доступу до ресурсу: <https://www.akm.com/kr/ko/products/gas-sensing/infrared-led-element-for-ndir-gas-sensor/>
8. Теоретичні основи та використання NDIR. Режим доступу до ресурсу: https://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/Technical-Note-169_Theory-And-Operation-Of-NDIR-Sensors_04-02_RU.pdf
9. Вимірювач рівня CO₂ TFA AirCO₂ntrol Mini. Режим доступу до ресурсу: https://bt.rozetka.com.ua/tfa_airco2ntrol_mini_31500602/p8185012/characteristics/

10. Система NDIR на основі MEMS для моніторингу вуглекислого газу. Режим доступу до ресурсу:
[https://www.researchgate.net/publication/301241843_A_low_cost_MEMS_base
d_NDIR_system_for_the_monitoring_of_carbon_dioxide_in_breath_analysis_at
_ppm_levels](https://www.researchgate.net/publication/301241843_A_low_cost_MEMS_based_NDIR_system_for_the_monitoring_of_carbon_dioxide_in_breath_analysis_at_ppm_levels)
11. ІЧ-детектори. Режим доступу до ресурсу:
<https://www.lasercomponents.com/de-en/ir-components/ir-detectors/>
12. Термоелектричні інфрачервоні датчики на основі MEMS. Режим доступу до ресурсу: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11465-017-0441-2.pdf>
13. Мікроконтролер ESP32, технічні характеристики. Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ESP32>
14. Інфрачервоні детектори. Режим доступу до ресурсу: https://www.rp-photonics.com/infrared_detectors.html
15. Газовий аналіз, принципи та методи вимірів. Режим доступу до ресурсу: <http://analitech.ru/article1.html>
16. Фотонні кристали. Режим доступу до ресурсу:
<http://fdtd.kintechlab.com/ru/pc>